

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Tomáš Dadok

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Návrh a realizace monitorovacího systému stability
stavebních konstrukcí na platformě technologií IoT**

**Design and Implementation of the Structural Stability
Monitoring System on the IoT Platform**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Dadok**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Návrh a realizace monitorovacího systému stability stavebních konstrukcí na platformě technologií IoT**
Design and Implementation of the Structural Stability Monitoring System on the IoT Platform

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s vybranými technologiemi IoT.
2. Návrh a realizace HW části monitorovacího systému stability stavebních konstrukcí pro vybrané platformy IoT.
3. Návrh a implementace zpracování a vizualizace dat monitorovacího systému.
4. Analýza energetické náročnosti jednotlivých technologií IoT.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] XIAO, Perry. *Designing embedded systems and the internet of things (IoT) with the ARM Mbed*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018. ISBN 978-1119364016.
- [2] SHOVIĆ, John C. *Raspberry Pi IoT projects: prototyping experiments for makers*. New York: Apress, 2016. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-1378-0.
- [3] FATTAH, Hossam. *5G LTE narrow-band Internet of Things (LTE NB-IoT)*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1138317604.
- [4] MICRORISC. *IQRF Quick start guide*. [online]. © 2019 [cit. 2019-01-17]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [5] MICRORISC. *IQRF Cloud Technical guide*. [online]. © 2015 [cit. 2015-09-21]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [6] MICRORISC. *TR-72D datasheet*. [online]. © 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [7] MICRORISC. *IQRF OS v4.03D User's guide for TR-7xD*. [online]. © 2019. [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [8] MICRORISC. *IoT-StarterKit-01 Getting started guide*. [online]. © 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Návrh a realizace monitorovacího systému stability stavebních konstrukcí na platformě technologií IoT“ vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury.

Datum odevzdání: 15. května 2020



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Radovanovi Hájovskému, Ph.D, za pomoc a vedení mé diplomové práce, konzultace a cenné rady k této práci. Také za veškerou podporu při práci a velmi rychlou komunikaci za každých okolností.

Abstrakt

V rámci ekonomických úspor se stále častěji šetří na materiálech stavebních konstrukcí, díky čemuž může docházet ke zhoršení její stability. Z tohoto důvodu je vhodné monitorovat její stav pomocí měřicího systému. U měřicího systému je vhodné využít k odesílání naměřených dat IoT technologii, díky které dokáže zařízení bezobslužně pracovat na baterii po dobu několika let. Cílem této práce je návrh a realizace zařízení pro monitorování stability stavebních konstrukcí s využitím IoT technologií. Navržený měřicí systém umožňuje komunikaci pomocí čtyř IoT technologií, mezi které patří Sigfox, LoRA, NB-IoT a IQRF. Pro změnu komunikační technologie zařízení, je nutné zaměnit pouze IoT komunikační modul. Ostatní části měřicího systému zůstávají beze změny. Součástí této práce je i ukládání naměřených dat do MySQL databáze, jejich zpracování a vizualizace naměřených dat, ve vizualizačním prostředí Grafana. Protože u bateriového provozu zařízení je kladen důraz na jeho spotřebu, je provedena energetická analýza každé IoT technologie a provedeno jejich přehledné srovnání v tabulce.

Klíčová slova

Měřicí systém; IoT technologie; Sigfox; LoRa; NB-IoT; IQRF; senzor; akcelerometr; teploměr; Mikrokontrolér; Databáze; MySQL; Grafana; UART; I²C; Přenos dat; Zpracování dat; Vizualizace; Energetická analýza

Abstract

As a part of economic savings, it is increasingly being saved on construction materials, which can lead to a worst building stability. For this reason, it is advised to monitor building condition with a measuring system. It is a good choice to use IoT technologies for measuring and sending data because batteries in these devices can last for several years. The aim of this thesis is the design and implement equipment for monitoring the stability of building structures using IoT technology. The proposed measuring system enables communication using four IoT technologies, including Sigfox, LoRA, NB-IoT and IQRF. To change the communication technology, user have to change only the IoT communication module. The other parts of the measuring system are unchanged. Part of this thesis is also about collecting measured data and storing it in MySQL database, their processing and visualization of measured data in the Grafana environmen. Battery consumption is very important in these devices so the energetic consumption analysis for each IoT technology is performed and they are compared in a table.

Key words

Measuring systém, IoT technologies, Sigfox, LoRa, NB-IoT, IQRF, Sensor, Accelerometer, Thermometer, Microcontroller, Database, MySQL, Grafana, UART, I²C, Data transfer, Data processing, Visualization, Enegetic consumption analysis

Obsah

| | |
|-----------------------------------|----|
| Seznam použitých zkratk | 10 |
| Seznam obrázků..... | 12 |
| Seznam tabulek..... | 15 |
| Úvod | 16 |
| 1 IoT technologie..... | 17 |
| 1.1 Sigfox technologie..... | 18 |
| 1.1.1 Rádiový přenos | 18 |
| 1.1.2 Architektura sítě..... | 18 |
| 1.1.3 Přenosový protokol..... | 19 |
| 1.1.4 Pokrytí | 20 |
| 1.2 LoRa technologie..... | 21 |
| 1.2.1 LoRa modulace..... | 21 |
| 1.2.2 LoRaWAN protokol | 22 |
| 1.2.3 Třídy LoRaWAN..... | 22 |
| 1.2.4 Architektura sítě..... | 22 |
| 1.2.5 Aktivace zařízení | 23 |
| 1.2.6 Pokrytí signálem | 23 |
| 1.3 NB-IoT technologie..... | 24 |
| 1.3.1 Architektura sítě..... | 24 |
| 1.3.2 Protokol NB-IoT | 25 |
| 1.3.3 Rádiový přenos NB-IoT | 25 |
| 1.3.4 Pokrytí signálem | 26 |
| 1.4 IQRF | 28 |
| 1.4.1 Rádiový přenos | 28 |
| 1.4.2 DPA protokol..... | 28 |
| 1.4.3 Architektura sítě..... | 28 |
| 1.4.4 Bondování..... | 29 |
| 1.4.5 Operační systém..... | 29 |
| 1.4.6 Aplikační přístup | 30 |
| 1.4.7 IQRF brána | 30 |
| 1.4.8 Režimy provozu..... | 30 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2 | Návrh HW | 31 |
| 2.1 | Blokové schéma měřicí a komunikační části..... | 31 |
| 2.2 | Blokové schéma napájecí části | 31 |
| 2.3 | Použitý hardware | 32 |
| 2.3.1 | Základní deska | 32 |
| 2.3.2 | Sigfox modul | 33 |
| 2.3.3 | LoRa modul | 34 |
| 2.3.4 | Lora brána | 35 |
| 2.3.5 | NB-IoT modul | 37 |
| 2.3.6 | IQRf modul | 38 |
| 2.3.7 | IRQF brána | 40 |
| 2.3.8 | Mikrokontrolér..... | 40 |
| 2.3.9 | Modul dobíječe | 41 |
| 2.3.10 | Baterie..... | 41 |
| 2.3.11 | Senzory | 42 |
| 2.4 | Konstrukční provedení | 43 |
| 3 | Návrh softwaru | 46 |
| 3.1 | Software mikrokontroléru..... | 46 |
| 3.2 | Software IQRf čipu..... | 47 |
| 3.3 | Konfigurace senzorů..... | 48 |
| 3.4 | Komunikace s IoT moduly | 49 |
| 3.4.1 | Sigfox IoT modul..... | 49 |
| 3.4.2 | LoRa IoT modul | 50 |
| 3.4.3 | NB-IoT IoT modul..... | 51 |
| 4 | Zpracování a vizualizace dat | 52 |
| 4.1 | Měřicí řetězec sběru dat..... | 52 |
| 4.2 | Protokol odesílaných dat IoT moduly..... | 52 |
| 4.3 | Přenos dat | 53 |
| 4.3.1 | Sigfox..... | 53 |
| 4.3.2 | LoRa | 54 |
| 4.3.3 | NB-IoT..... | 56 |
| 4.3.4 | IQRf | 56 |
| 4.4 | Zpracování dat | 57 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4.1 | Akcelerometr | 58 |
| 4.4.2 | Teploměr..... | 59 |
| 4.4.3 | Napětí..... | 59 |
| 4.5 | Ukázka naměřených dat..... | 60 |
| 4.5.1 | Ukázka dat Sigfox..... | 60 |
| 4.5.2 | Ukázka dat LoRa | 60 |
| 4.5.3 | Ukázka dat NB-IoT..... | 61 |
| 4.5.4 | Ukázka dat IQRF | 61 |
| 4.6 | Vizualizace dat | 62 |
| 5 | Analýza energetické náročnosti..... | 64 |
| 5.1 | Měření spotřeby elektrické energie | 64 |
| 5.2 | Analýza naměřených dat energetické náročnosti | 65 |
| 5.3 | Průběhy proudových odběrů..... | 67 |
| 5.3.1 | Sigfox..... | 67 |
| 5.3.2 | Lora..... | 68 |
| 5.3.3 | NB-IoT..... | 69 |
| 5.3.4 | IQRF | 70 |
| 5.4 | LoRa brána a IQRF brána..... | 70 |
| 5.5 | Výpočet výdrže baterie | 71 |
| 6 | Vize do budoucna | 72 |
| | Závěr..... | 73 |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Význam |
|----------------|---|
| A/D | Analog to digital |
| ABP | Activation By Personalisation |
| AES | Advanced Encryption Standard |
| AES128 | Advanced Encryption Standard 128 |
| APN | Access Point Name |
| AppEUI | Identifikátor aplikace |
| AppKey | Aplikační klíč |
| AppSKey | Aplikační šifrovací klíč |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| ČRA | České radiokomunikace |
| DBPSK | Differential binary phase-shift keying |
| DevAddr | Adresa zařízení |
| DevEUI | Identifikátor zařízení |
| DPA | DynDirect Peripheral Accessamic Product Ad |
| ESD | ElectroStatic Discharge |
| GPIO | General Purpose Input Output |
| GPS | Global Positioning Systém |
| GSM | Groupe Spécial Mobile |
| HTTP | HyperText Transport Protocol |
| Chirp | Compressed High Intensity Radar Pulse |
| I2C | Internal-Integrated-Circuit Bus |
| ID | Identification |
| IMSI | International Mobile Subscriber Identification |
| IoT | Internet of Things |
| ISM | Information Security Management System |
| JSON | Java Script Object Notation |
| LED | Light emitting diode |
| Li-ion | Lithium Iont |
| Li-Pol | Lithium Polymer |
| LoRa | Long Range |
| LoRaWAN | Long Range Wide Area Network |
| LP | Low Power |
| LPWA | Low-Power Wide-Area |
| LTE | Long Term Evolution |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport |
| NB-IoT | Narrow Band - Internet of Things |
| NB-IoT | Narrow Band Internet of Things |
| NwkSKey | Síťový šifrovací klíč |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| OS | Operating Systém |
| OTAA | Over-TheAir Activation |

| | |
|---------|---|
| PAC | Porting Authorization Code |
| PSM | Power Save Management |
| PWM | Pulse width modulation |
| RF | Radio Frequency |
| SC-FDMA | Single Carrier Frequency Division Multiple Access |
| SDRAM | Synchronous Dynamic Random Access Memory |
| SIM | Subscriber identity module |
| SMD | Surface Mount Device |
| SMS | Short message service |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| STD | Standard |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TCP/IP | Transmission Control Protocol/Internet Protocol |
| TTN | The Things Network |
| UART | Universal asynchronous receiver transceiver |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UNB | Ultra Narrow Band |
| WCDMA | Wideband Code Division Multiple Access |
| XLP | Extra Low Power |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1 - IoT technologie, [1] | 17 |
| Obrázek 1.2 - Sigfox logo, [1] | 18 |
| Obrázek 1.3 - Architektura přenosu dat, [6] | 19 |
| Obrázek 1.4 - Sigfox struktura zpráv, [2] | 19 |
| Obrázek 1.5 - Pokrytí signálem Sigfox území České republiky, [5] | 20 |
| Obrázek 1.6 - Pokrytí signálem Sigfox celosvětově, [5] | 20 |
| Obrázek 1.7 - Logo LoRa, [1] | 21 |
| Obrázek 1.8 - LoRa modulace, [12] | 21 |
| Obrázek 1.9 - architektura přenosu dat, [6] | 22 |
| Obrázek 1.10 - Mapa pokrytí sítě LoRaWAN Českými komunikacemi z října 2018, [10] | 23 |
| Obrázek 1.11 - Logo NB-IoT, [1] | 24 |
| Obrázek 1.12 - Architektura technologie NB-IoT, [6] | 24 |
| Obrázek 1.13 - Standalone metoda, [13] | 25 |
| Obrázek 1.14 - In-band metoda, [13] | 25 |
| Obrázek 1.15 - Guard band metoda, [13] | 26 |
| Obrázek 1.16 - Pokrytí České republiky signálem LTE, operátor Vodafone, [6] | 26 |
| Obrázek 1.17 - Pokrytí České republiky signálem LTE, operátor 02, [6] | 27 |
| Obrázek 1.18 - Logo IQRF, [1] | 28 |
| Obrázek 1.19 - IQRF komunikační režim bez sítě, peer to peer | 28 |
| Obrázek 1.20 - IQMESH síť technologie IQRF, [17] | 29 |
| Obrázek 1.21 - Aplikační přístup s programováním v jazyce C, přímo pod OS, [16] | 30 |
| Obrázek 1.22 - Aplikační přístup bez programování, podle DPA, [16] | 30 |
| Obrázek 2.1 - Blokové schéma datové části, (vlevo Sigfox, LoRa, NB-IoT, vpravo IQRF) | 31 |
| Obrázek 2.2 - Blokové schéma napájecí části | 32 |
| Obrázek 2.3 - Základní deska s osazeným mikrokontrolérem | 33 |
| Obrázek 2.4 - IoT modul Sigfox | 34 |
| Obrázek 2.5 - IoT modul LoRa | 35 |
| Obrázek 2.6 - LoRa brána | 36 |
| Obrázek 2.7 - NB-IoT modul | 38 |
| Obrázek 2.8 - Označení IQRF modulu, [16] | 38 |
| Obrázek 2.9 - IoT modul IQRF | 39 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 2.10 - IQRF brána | 40 |
| Obrázek 2.11 - modul dobíječe LT3652EMSE#PBF | 41 |
| Obrázek 2.12 - Li-Pol baterie | 41 |
| Obrázek 2.13 - Konstrukční uspořádání jednotlivých komponent zařízení, pohled z boku | 44 |
| Obrázek 2.14 - Programátor | 44 |
| Obrázek 2.15 - Základní deska, popis konektorů | 45 |
| Obrázek 2.16 - Sestavené zařízení (v krabičkách)..... | 45 |
| Obrázek 3.1 - Stavový diagram mikrokontroléru | 46 |
| Obrázek 3.2 - Stavový diagram IQRF čipu | 48 |
| Obrázek 3.3 - Stavový diagram činnosti IoT modulu Sigfox | 49 |
| Obrázek 3.4 - Stavový diagram inicializace a činnosti IoT modulu LoRa | 50 |
| Obrázek 3.5 - Stavový diagram inicializace a činnosti IoT modulu NB-IoT | 51 |
| Obrázek 4.1 - Měřicí řetězec IoT technologií, Sigfox, LoRa, NB-IoT | 52 |
| Obrázek 4.2 - Měřicí řetězec IoT technologie IQRF | 52 |
| Obrázek 4.3 - Pořadí dat odesílaných zařízením | 52 |
| Obrázek 4.4 - Ukázka archivovaných dat na Sigfox backend serveru..... | 54 |
| Obrázek 4.5 - Ukázka tří zpráv LoRa - TTN..... | 54 |
| Obrázek 4.6 - Ukázka vytvoření eui LoRa brány | 55 |
| Obrázek 4.7 - Ukázka tří zpráv LoRa brány- TTN..... | 55 |
| Obrázek 4.8 - Ukázka jedné zprávy LoRa - České Radiokomunikace..... | 55 |
| Obrázek 4.9 – Ukázka výpisu příchozí zprávy do konzole - T-Mobile..... | 56 |
| Obrázek 4.10 - Ukázka jedné zprávy - server HARDWARIO | 56 |
| Obrázek 4.11 - Ukázka zpráv IQRF | 57 |
| Obrázek 4.12 - Ukázka IQRF sítě - rozhraní IQRF brány | 57 |
| Obrázek 4.13 - Časovač pro vyčítání dat..... | 57 |
| Obrázek 4.14 - Grafické znázornění pro výpočet úhlu osy X..... | 59 |
| Obrázek 4.15 - Ukázka surových dat technologie Sigfox..... | 60 |
| Obrázek 4.16 - Ukázka zpracovaných dat technologie Sigfox | 60 |
| Obrázek 4.17 - Povolovací tabulka technologie Sigfox | 60 |
| Obrázek 4.18 - Ukázka surových dat technologie LoRa | 60 |
| Obrázek 4.19 - Ukázka zpracovaných dat technologie LoRa..... | 60 |
| Obrázek 4.20 - Povolovací tabulka technologie LoRa | 61 |
| Obrázek 4.21 - Ukázka surových dat technologie NB-IoT..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 4.22 - Ukázka zpracovaných dat technologie NB-IoT | 61 |
| Obrázek 4.23 - Povolovací tabulka technologie NB-IoT | 61 |
| Obrázek 4.24 - Ukázka surových dat technologie IQRF | 61 |
| Obrázek 4.25 - Ukázka zpracovaných dat technologie IQRF | 61 |
| Obrázek 4.26 - Povolovací tabulka technologie IQRF | 61 |
| Obrázek 4.27 - Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Náklon, Tíhové zrychlení) | 62 |
| Obrázek 4.28- Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Teplota, Napětí baterie) | 63 |
| Obrázek 4.29 - Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Stav dobíječe, Síla signálu) | 63 |
| Obrázek 5.1 - Měření spotřeby na měřicím pracovišti | 64 |
| Obrázek 5.2- graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií Sigfox | 67 |
| Obrázek 5.3 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií LoRa | 68 |
| Obrázek 5.4 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií NB-IoT | 69 |
| Obrázek 5.5 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií IQRF | 70 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 2.1 - Označení Sigfox modulu WSSFM10R1AT, [18] | 33 |
| Tabulka 2.2 - Sigfox, základní údaje modulu WSSFM10R1AT, [18] | 33 |
| Tabulka 2.3 - Základní parametry modulu RN2483, [19] | 35 |
| Tabulka 2.4 - Základní parametry minipočítače Raspberry Pi model 2B, [22] | 36 |
| Tabulka 2.5 - Základní parametry LoRa modulu iC880A, [23] | 37 |
| Tabulka 2.6 - Základní parametry čipu BC68,[24] | 37 |
| Tabulka 2.7 - Základní parametry IQRf node, [16] | 39 |
| Tabulka 2.8 - Základní parametry mikrokontroléru STM32L083CZT6, [24] | 40 |
| Tabulka 2.9 - Základní parametry čipu LT3652EMSE#PBF, [26] | 41 |
| Tabulka 2.10 - I2C adresy senzorů | 42 |
| Tabulka 2.11 - Základní parametry akcelerometru LIS2DW12TR, [21] | 42 |
| Tabulka 2.12 - Základní parametry teploměru MCP9808, [20] | 43 |
| Tabulka 2.13 - Adresace IoT modulů | 45 |
| Tabulka 3.1 - Základní AT příkazy pro komunikaci s Sigfox modulem, [18] | 49 |
| Tabulka 3.2 - Základní AT příkazy pro komunikaci s LoRa modulem, [28] | 50 |
| Tabulka 3.3 - Základní AT příkazy pro komunikaci s NB-IoT modulem, [27] | 51 |
| Tabulka 4.1 - Kódovaná teplota ve dvou bajtech, [20] | 59 |
| Tabulka 5.1 - Tabulka s údaji energetické analýzy | 66 |
| Tabulka 5.2 - Maximální teoretická výdrž zařízení na jedno nabití baterie | 71 |

Úvod

Monitorovací systémy se dnes stále častěji uplatňují pro měření různých veličin. Spojení měřicího systému s IoT technologiemi přináší velkou výhodu, pokud potřebujeme měřit po dlouhou dobu, bez nutnosti obsluhy. Zařízení vybavené IoT technologiemi bývají napájeny pomocí baterií, na které dokáží měřit spoustu let. Není tedy potřeba v zařízení baterii často vyměňovat, proto je možné tyto zařízení nainstalovat i na špatně přístupná místa. Obzvlášť monitorování stability konstrukcí je velmi důležité. V případě špatně nebo zhoršující se stability konstrukce může dojít k jejich zhroucení, při kterém často dochází k ohrožení lidského života a v horších případech i k obětem. Díky monitorovacímu systému stability konstrukcí, je možné těmto katastrofálním následkům předcházet.

Cílem této práce je navrhnout a následně zrealizovat monitorovací systém pro měření stability stavebních konstrukcí na platformě IoT technologií. Pro návrh a realizaci jsou vybrány čtyři IoT technologie, Sigfox, LoRa, NB-IoT a IQRF. Tyto vybrané IoT technologie jsou zejména porovnávány z hlediska jejich energetické náročnosti. Při hardwarové i softwarové realizaci je kladen velký důraz na výslednou spotřebu měřicího systému. Konstrukčně je celý měřicí systém umístěn do jediné krabičky obsahující veškeré potřebné komponenty. Systém se skládá ze senzorů pro měření stability konstrukce pomocí akcelerometru a teploměru, pro měření teploty zařízení. Aby byla prodloužena výdrž zařízení na bateriový provoz, nachází se na krabičce solární panel, který se stará o dobíjení interní baterie. Díky dobíjení je zařízení schopno provozu po velmi dlouhou dobu, bez nutnosti výměny baterie. Velkou výhodou navrhovaného zařízení je možnost výměny IoT modulu za jiný, bez nutnosti jakéhokoli zásahu do základní desky zařízení.

Práce je rozdělena na teoretickou část týkající se IoT technologií a praktickou část, týkající se návrhem a realizací měřicího systému. Praktická část se také zabývá přenosem dat ze zařízení na server, včetně uložení do databáze. Dále se zabývá zpracováním dat a následnou vizualizací. Poslední část práce je zaměřena na energetickou analýzu měřicího systému.

V teoretické části je proveden rozbor jednotlivých IoT technologií. Popisována je zejména architektura sítě, rádiový přenos, aktivace zařízení a pokrytí signálem. Popisovány jsou také další parametry a důležité údaje dané technologií.

Praktická část je rozdělena na kapitoly popisující dílčí úkoly praktické části. Nejprve je zobrazeno blokové schéma celého měřicího systému, včetně napájecí části. Dále jsou popisovány veškeré jednotlivé komponenty, které jsou použity při realizaci hardwaru měřicího systému. Veškerý zhotovený hardware je zachycen na obrázcích. Další kapitola praktické části je zaměřena na software mikrokontroléru, IQRF čipu a komunikaci s jednotlivými IoT moduly.

Čtvrtá kapitola se zabývá zpracováním a vizualizací naměřených dat. Popisován je přenos dat pomocí IoT technologií, včetně jejich zpracování a uložení do databáze v podobě surových dat. Následně je popisován spouštěcí skript, který se stará o zpracování surových dat na data užitečná, nesoucí již potřebné informace o naměřené stabilitě konstrukce. Jako důkaz funkčnosti všech IoT technologií jsou přiložena ukázková data, která vždy zobrazují jednu synchronní zprávu a druhou asynchronní, včetně tabulky pro povolení zpracování dat ze zařízení. Výsledná data jsou vizualizována pomocí vizualizačního nástroje Grafana. Pro názornější ukázkou jsou zobrazena data z upraveného ilustračního měření.

Pátá kapitola je zaměřena na energetickou analýzu, kde jsou jednotlivé IoT technologie porovnány. Činnost IoT modulů je vysvětlena pomocí grafického znázornění jejich spotřeby.

1 IoT technologie

Internet věcí je novým trendem poslední doby. IoT technologie využívají bezdrátový přenos dat s nízkou energetickou náročností. Zařízení využívající IoT technologie zpravidla vydrží na jednu baterii okolo 5 až 15 let, kde samotou výdrž udává zejména použitá technologie. Výdrž je také ovlivněna frekvencí, jak často zařízení komunikuje a energetickou náročností použitých senzorů. Koncové zařízení může být vybaveno například solárním panelem, který baterii dobíjí a zařízení bude tedy schopné pracovat ještě déle.

IoT technologie propojují jednotlivé zařízení s internetem. Propojení mnoha zařízení umožňuje sběr velkého objemu dat, která je možné dále zpracovávat, analyzovat, vizualizovat a dále využívat.

Mezi nejznámější IoT bezdrátové technologie patří Sigfox, Lora, NB-IoT, IQRF, BLE, ZigBee, WiFi, Z-Wave a další. Obrázek (Obrázek 1.1) zobrazuje Loga IoT bezdrátových technologií. Každá technologie využívá k přenosu dat jiného principu komunikace. Některé z technologií je možné využívat bez nutnosti vybudování sítě přijímačů, díky využití již vybudované sítě třetích stran. Takto můžeme využít v České republice například technologii Sigfox, LoRa, NB-IoT. Některé technologie jako je například IQRF nevyužívají pokrytí signálem třetí stranou a je nutné výstavbu vlastní sítě. Každá technologie má své výhody i nevýhody. Využívání třetích stran vede k placení poplatků za využívání, ale k rychlejšímu nasazení bez nutnosti řešení sítě, pokud se zařízení bude nacházet v dosahu sítě třetích stran. Vybudování vlastní sítě naopak vede k složitějšímu a dražšímu nasazení IoT zařízení, ale k finanční úspoře, protože není potřeba platit poplatky třetím stranám.

IoT technologiemi se propojuje stále více zařízení v různých oborech jako je například automatizace, ovládání a řízení, zabezpečení, tepelná technika, vzdálený odpočet vody, elektřiny, plynu. Nechybí ani propojování domácích spotřebičů. Lednička napojená na internet pomocí IoT technologií dokáže monitorovat stav potravin a v případě, kdy nějaká potravina dojde, může objednat další. V lékařství IoT náramek může monitorovat zdravotní stav člověka a v případě potřeby automaticky zavolat pomoc podle GPS souřadnic náramku. Využití těchto technologií se může uplatnit opravdu ve všech odvětvích. [1][6]



Obrázek 1.1 - IoT technologie, [1]

1.1 Sigfox technologie

Společnost Sigfox vznikla v roce 2009 ve Francii, kde i nadále působí. Zakladateli jsou Ludovic Le Moan a Christophe Fourtet. Jedná se o bezdrátovou komunikační síť pro přenos malého množství dat s dlouhým dosahem, při velmi malé spotřebě energie. Maximální vzdálenost od vysílače se uvádí 50km ve volném prostoru a 3 až 10km v zastavěných oblastech. Skutečný dosah se může velmi lišit v závislosti na prostředí a okolním rušení.

Vhodný pro občasné odesílání dat, například odesílání alarmových zpráv. Sigfox je ideální náhradou pro aplikace, které dříve využívaly k odesílání dat SMS zprávy. Sigfox nemusí sloužit pouze pro alarmové odesílání zpráv, ale i k cyklickému odesílání.

Typickou oblastí pro technologii Sigfox je v Evropě odečet elektřiny, vody, plynu, sledování teploty v přepravních kontejnerech, Průmysl 4.0 a mnoho dalšího. [2]



Obrázek 1.2 - Sigfox logo, [1]

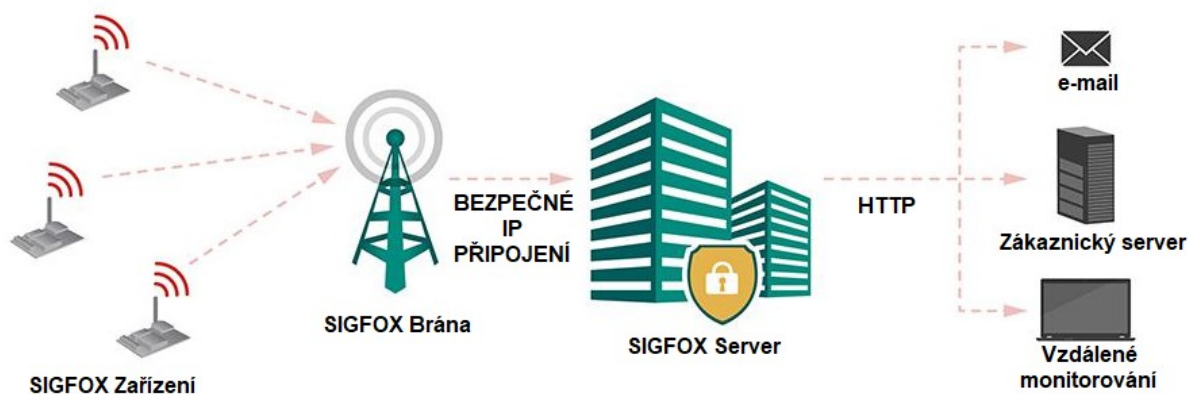
1.1.1 Rádiový přenos

Technologie Sigfox využívá bezlicenční pásmo ISM na frekvenci 868 MHz a v USA 906MHz. V tomto bezlicenčním pásmu běží krátkodosahové technologie, jako je například otevírání vrat, domácí meteorostanice, dálkově ovládané zásuvky a mnoho dalšího. Výhodou toho pásma jsou nulové náklady za licenci pro využívání tohoto pásma. Další výhodou je neovlivňování signálu technologiemi bluetooth nebo wifi.

Ke komunikaci se využívá UNB pásmo, kdy se využívá jen krátkého datového pulsu s omezeným výkonem na 25mW. Využívána je modulace o frekvenci 200kHz. Každá zpráva v době přenosu zabírá pouze šířku pásma 100Hz. Přenášená je rychlostí 100 nebo 600 bitů/s v závislosti na regionu vysílání. Vysílaná zpráva využívá modulaci DBPSK, která při frekvenci 100 Hz využívá přenosu 100bitů/s. Díky tomuto způsobu vysílání je přenos velmi odolný proti rušení. Díky velmi efektivnímu využívání přenosového spektra mohou přijímače snadno demodulovat vysílaný signál i velmi blízký hladině šumu. Citlivost Sigfox přijímačů může dosahovat až -142dBm při frekvenci 100Hz. [2]

1.1.2 Architektura sítě

Samotná síť technologie Sigfox využívá topologii hvězdy a je tvořena základnovými stanicemi. Pokud je rádiový signál koncového zařízení v dosahu alespoň jedné základnové stanice, je signál stanicí přijat a dál odeslán do Sigfox cloudu. Na cloud jsou data ze stanice odesílána pomocí místních Sigfox operátorů přes TCP/IP internetovou komunikaci. Základnové stanice zprávy detekují a demodulují pouze pro Sigfox cloud. Cloud poté přijaté zprávy třídí a obvykle posílá po TCP/IP internetu do zákaznických zařízení nebo IT platform. Obrázek (Obrázek 1.3) zobrazuje architekturu přenosu, od koncového zařízení až po přenos dat k zákazníkovi.



Obrázek 1.3 - Architektura přenosu dat, [6]

Každé zařízení je v Sigfox síti je identifikováno pomocí unikátního 32 bitového ID. Toto ID je každému Sigfox modulu přiřazeno při výrobě. Vlastnictví modulu se převádí online na PAC kód, který je u každého modulu uveden již při nákupu modulu. Pomocí ID a PAC kódu je možné Sigfox modul zaregistrovat a využívat. V případě odregistrování modulu je vygenerován nový PAC a starý zaniká. Pomocí nového PAC kódu je možné modul opět zaregistrovat. Vlastník předcházejícího PAC po vygenerování nového, ztrácí veškerý přístup k modulu. V jednu chvíli může mít přístup k modulu pouze jeden uživatel. [6]

1.1.3 Přenosový protokol

Sigfox byl primárně určen pro přenos malých zpráv, proto záměrně využívá jednoduchý protokol. Celková velikost zprávy je maximálně 26 bajtů. Pro odesílání dat z koncového zařízení do Sigfox cloudu je 0 až 12 bajtů určeno pro užitečná data uživatele, ostatní jsou dána Sigfox protokolem. Pro komunikaci opačným směrem, tedy z cloudu do koncového zařízení je zpráva omezena pouze na 0 až 8 bajtů užitečných dat uživatele. Počet zpráv je taktéž omezen. Pro odesílání z koncového zařízení na maximálně 140 zpráv denně a pro data z cloudu do koncového zařízení na maximálně 4 zprávy denně. Při omezení na 140 zpráv denně, může zařízení odesílat zprávu přibližně co deset minut. Omezení platí na celý den, v případě potřeby je možné odeslat více zpráv hned po sobě, ale musí poté zvětšit časové rozestupy mezi jednotlivými cyklickými zprávami, aby nebyl překročen maximální počet 140 zpráv za den. Na obrázku (Obrázek 1.4) níže můžeme vidět vyobrazenou strukturu celé zprávy. Velikost zpráv a jejich množství je přímo úměrné spotřebě zařízení.

Odesílaná data nemají přesně definovanou strukturu, uživatel si tedy sám může zvolit strukturu odesílaných nebo přijímaných dat. Omezení se týká pouze délky zprávy.

Přenosová rychlost je 100bit/s. V případě odesílání maximálně dlouhé zprávy 12bajtů trvá přenos jedné zprávy dvě sekundy. Pro zajištění spolehlivého přenosu je tato zpráva vysílána třikrát po sobě. Celková délka odesílání zprávy je tedy 6 sekund. Potvrzení přijetí zprávy není nijak kontrolováno. Pokud by došlo k výpadku signálu, zpráva bude ztracena a koncové zařízení tuto skutečnost nepozná. [2]

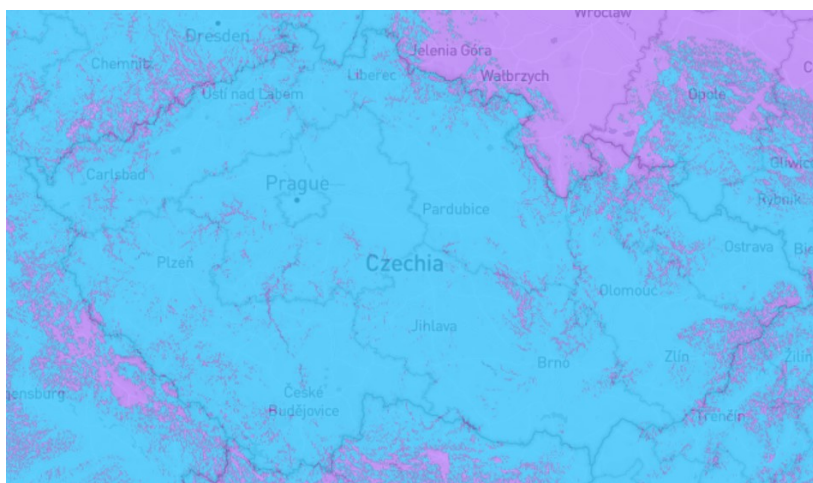
| preamble | frame sync. | end-device ID | payload | auth. | FCS | Uplink MAC Frame |
|----------|-------------|---------------|--------------|-------|---------|------------------|
| 4 bytes | 2 bytes | 4 bytes | 0 - 12 bytes | var. | 2 bytes | |

| preamble | frame sync. | flags | FCS | auth. | error codes | payload | Downlink MAC Frame |
|----------|-------------|--------|--------|---------|-------------|---------|--------------------|
| 32 bits | 13 bits | 2 bits | 8 bits | 16 bits | var. | var. | |

Obrázek 1.4 - Sigfox struktura zpráv, [2]

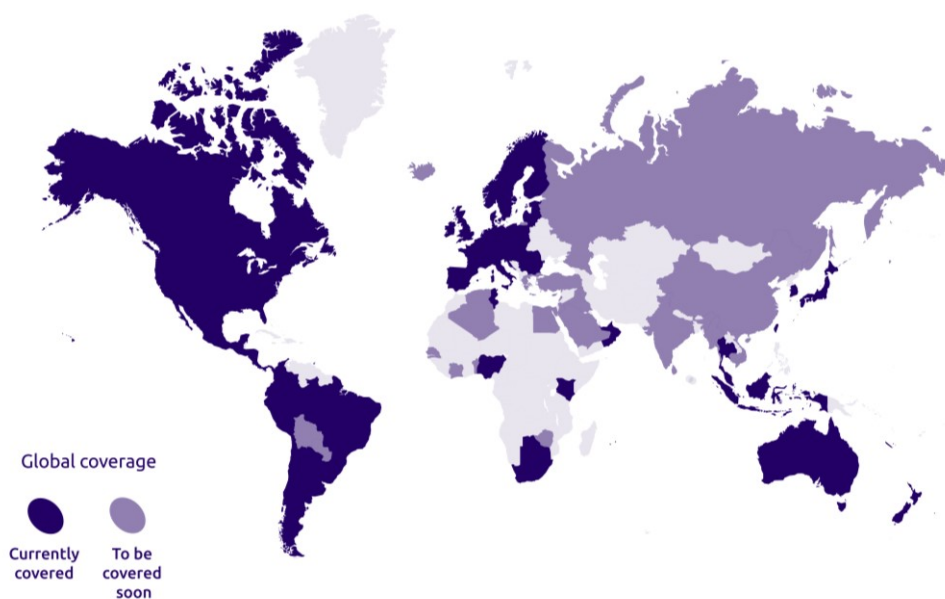
1.1.4 Pokrytí

Přenosová síť Sigfoxu je v dnešní době v České republice již dokončena. Vybudovaná síť dnes pokrývá 96% české populace, 94% území. Signál Sigfoxu dosahuje i do míst, kde není GSM signál mobilních operátorů. Operátorem sítě Sigfox je SimpleCell Networks a.s., technologickým partnerem je společnost T-mobile, která na svých současných základnových stanicích poskytuje infrastrukturu pro Sigfox technologii. Momentálně je v České republice 320 aktivních stanic. Velká hustota stanic zajišťuje překrývání dosahů stanic, což vede k velké imunitě proti rušení. Pro přenos dat dostačuje zaznamenání zprávy jen na jedné ze stanic. Díky takové hustotě a takovému řešení se udává úspěšnost přenosu téměř 100%. Obrázek níže (Obrázek 1.5) vyobrazuje pokrytí signálu České republiky a jejího blízkého okolí. Mapa pokrytí pochází z oficiálních stránek Sigfox ze dne 19. září 2019.



Obrázek 1.5 - Pokrytí signálem Sigfox území České republiky, [5]

Pokrytí nekončí hranicí České republiky. Sigfox již funguje v 67 zemích světa. Na obrázku (Obrázek 1.6) můžeme vidět světový pohled na dostupnost sítě Sigfox a její zavádění. Mapa pokrytí taktéž pochází z oficiálních stránek Sigfox ze dne 19. září 2019. [4][5][6]



Obrázek 1.6 - Pokrytí signálem Sigfox celosvětově, [5]

1.2 LoRa technologie

Francouzští inženýři společnosti Cyclo od roku 2009 vyvíjeli unikátní protokol pro komunikaci na prahu šumu, s velkým dosahem a energetickou nenáročností. Společnost Cyclo se spojila se společností Semtech a v roce 2012 představili technologii LoRa. Aktuálně technologii spravuje společenství Aliance LoRa založené v roce 2015.

Jedná se o bezdrátovou komunikační technologii pro přenos menšího množství dat. LoRa technologie využívá LoRa modulaci a LoRaWAN protokol. Dosah vysílače se uvádí na volném prostranství až 40 km. V příměstských oblastech 10 km až 15 km a ve městě 2 km až 5 km. Jedná se však spíše o teoretický dosah. Reálný dosah se může lišit od teoretického v závislosti na hustotě zástavby, okolního rušení, prostředí a dalších okolnostech.

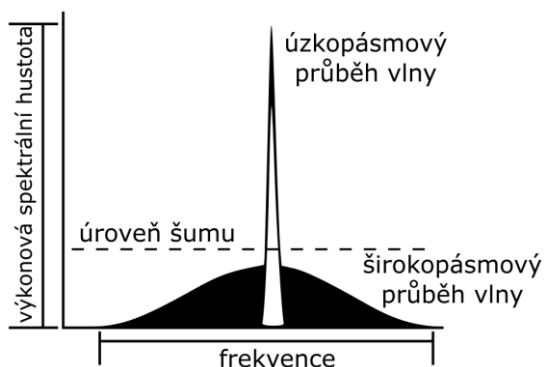
Vhodná je zejména pro odesílání menšího množství dat z IoT zařízení nebo zasílání dat zařízením. Počet zpráv není omezen na rozdíl od předchozího typu komunikace přes Sigfox a délka zprávy může být podstatně delší. Tato technologie je vhodná pro širokou oblast použití. Například ve zdravotnictví, průmyslu 4.0, sledování dopravních kontejnerů, odečty elektřiny, vody, plynu a nespočet dalších odvětví. [6]



Obrázek 1.7 - Logo LoRa, [1]

1.2.1 LoRa modulace

Fyzická vrstva LoRa využívá modulace rozprostřeného spektra, která je vyobrazena na obrázku (Obrázek 1.8). Poměrně novou modulaci CHIRP patentovanou firmou Semtech, která vyrábí i samotné čipy. Využívá lineární změny frekvence od spodní hranice k horní hranici a opačně. Na tento signál je přerušováním modulována přenášená informace. Modulovaný signál je takto odolnější vůči Dopplerovskému jevu a jsou také sníženy nároky na přesnost kmitočtu obvodu. Jeden kanál může současně využívat několika vysílačů, protože komunikace může probíhat na více frekvencích. Vysílání probíhá v nelicencovaném pásmu v Evropě na frekvenci 868 MHz až 870 MHz nebo frekvenci 902 MHz až 928 MHz pro americké pásmo. Může také využívat frekvence 433 MHz. Vysílací výkon je omezen na 25 mW. Citlivost přijímačů se udává přibližně 140 dBm. [10][12]



Obrázek 1.8 - LoRa modulace, [12]

1.2.2 LoRaWAN protokol

Protokol využívá více technik zabezpečení. Každé koncové zařízení má přidělený jedinečný 64-bitový identifikátor a dva 128-bitové klíče. Data jsou zabezpečena pomocí AES128 šifrování. První klíč má provozovatel sítě, aby bylo možné na stejném území provozovat více sítí. Druhý klíč má provozovatel služby neboli koncový zákazník k zabezpečení přenosu dat mezi sítí a uživatelskou.

Rychlost přenosu je 250 bps až 50 kbps. Počet zpráv za den není nijak omezen oproti předchozí technologii Sigfox. Protokol umožňuje plně obousměrnou komunikaci. Omezena je délka zprávy na maximálně 256 bajtů. V případě potřeby přenosu více dat, musí se data rozdělit na více zpráv. [6][7]

1.2.3 Třídy LoRaWAN

LoRaWAN rozlišuje tři třídy použití. Každá třída je vhodná pro určité použití a zařízení podle využití třídy spotřebovává jiné množství elektrické energie.

Zařízení pracující v třídě A může přijímat data pouze v okně, otevřeném chvíli poté, když se data z koncového zařízení, přes otevřené odesílací okno odešlou. Tato třída je nejméně energeticky náročná a je tedy nejvhodnější pro využití pro IoT senzory.

Třída B se chová stejně jako třída A, ale má navíc přidána přijímací okna, která se otevírají v nastavenou dobu. Třída B je vhodná pro IoT zařízení, kde se vyžaduje snížení odezvy. Spotřeba zařízení v této třídě je však vyšší než zařízení pracující v předchozí třídě A.

Poslední třída C poskytuje téměř nepřetržitě otevřené přijímací okno. Toto okno se uzavírá pouze v případě vysílání, kdy je otevřeno vysílací okno. Spotřeba této třídy je nejvyšší ze všech tříd. Vhodná je pro použití u zařízení chovajících se jako LoRaWAN brána, kde musí zařízení stále naslouchat, aby přijalo požadavky ostatních zařízení, a nízká spotřeba není prioritou. [7][8]

1.2.4 Architektura sítě

Technologie LoRa využívá topologii hvězdy. Sít' tvoří koncová zařízení a LoRa brány. Každé koncové zařízení odesílá zprávy bez ohledu na to, na kterou bránu má zprávu zaslat. Zpráva je přijata veškerými bránami v dosahu signálu. Dále je zpráva odeslána na cloud přes internetové připojení. V případě přijetí stejné zprávy z jednoho zařízení více bránami se na cloud uloží pouze jako jedna zpráva, aby se zabránilo jejímu duplicitnímu uložení z více brán. Obrázek (Obrázek 1.9) níže vyobrazuje cestu dat od koncového zařízení až do uživatelské aplikace. [6]



Obrázek 1.9 - architektura přenosu dat, [6]

1.2.5 Aktivace zařízení

Koncové zařízení je možné do sítě zaregistrovat pomocí dvou metod. Metodou OTAA nebo ABP. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Obě z metod jsou zabezpečeny na přibližně stejné úrovni.

Metoda OTAA využívá k registraci DevEUI, AppEUI a AppKey. Klíče jsou generovány v případě potřeby. Pokud dojde ke změně sítě, zařízení se znovu připojí a jsou mu vygenerovány nové klíče DevAddr. Zařízení nemusí být přeprogramováno při změně. Nevýhodou je nutnost ukládání dynamicky generovaných klíčů. Před komunikací je nejprve navázáno spojení a poté se až komunikuje.

Metoda ABP k aktivaci nevyžaduje DevEUI, AppEUI ani AppKey. Tyto klíče jsou zastoupeny NwkSKey a AppSKey, které jsou již uloženy v zařízení. Pro aktivaci je nutné zadat také DevAddr. Zařízení začne komunikovat i bez předchozího navázání spojení pomocí předprogramovaných klíčů. Výhodou je možnost komunikace bez předchozího navázání spojení. NwkSkey a AppSKey musí být jedinečné, jinak může dojít k ohrožení zabezpečení. Při změně sítě je nutné v zařízení klíče přeprogramovat. [9]

1.2.6 Pokrytí signálem

České radiokomunikace aktuálně pokrývají síť LoRaWAN všechny krajské města České republiky. V roce 2016 byly pokryty signálem jen některá větší města. Během dvou let se vše změnilo a dnes je však pokryta signálem téměř celá Česká republika. Ve většině případů je koncové zařízení v daném místě v dosahu více než jednoho vysílače, což přispívá k lepší kvalitě signálu a eliminaci neodeslání zprávy na cloud v případě výpadku vysílače. Pod textem můžeme vidět na obrázku (Obrázek 1.10) mapu pokrytí signálem z října roku 2018.



Obrázek 1.10 - Mapa pokrytí sítě LoRaWAN Českými komunikacemi z října 2018, [10]

Místo využití služeb Českých radiokomunikací, je možné si postavit vlastní bránu, která ale musí mít přístup k internetu. Bránu je možné zaregistrovat do infrastruktury The Thing Network, která tuto službu nabízí a provozovat ji. Díky vlastní bráně je možné vybudovat LoRa síť kdekoli i v oblastech bez pokrytí. Nejvýhodnějším řešením je vybudování vlastní sítě pomocí vlastních bran ve velkých podnicích s velkým množstvím LoRa koncových zařízení. Tato možnost vede k ekonomické úspoře, ale navíc je nutné spravovat vlastní brány a zajistit jejich připojení k internetu. [10]

1.3 NB-IoT technologie

NB-IoT je nová bezdrátová úzkopásmová technologie, která byla speciálně vyvinuta pro Internet věcí, označována jako LPWAN. Tato technologie je navrhována pro nasazení pro masivní počet komunikujících zařízení s velmi nízkou spotřebou energie. Dosah signálu se uvádí přibližně 15km. Oproti předchozím technologiím jako je Sigfox nebo LoRa, NB-IoT se velmi dobře šíří i do těžko dostupných míst přes několik zdí, v tunelu, v podzemí nebo oblast pod hladinou vody.



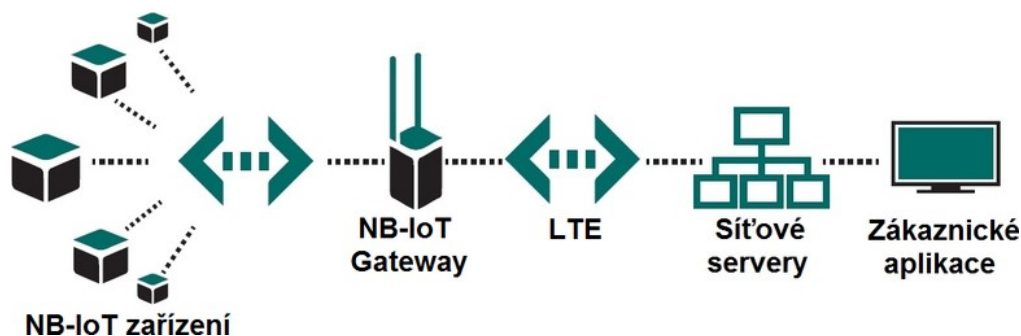
Obrázek 1.11 - Logo NB-IoT, [1]

Tato technologie je vhodná jak pro občasné odesílání dat, tak i pro častější komunikaci. Komunikace pomocí technologie NB-IoT je plně obousměrná a není nijak omezena počtem odeslaných zpráv. NB-IoT technologie je vhodná pro všestranné použití. Chytrá městka tuto technologii využívají například, k hlídání naplnění kontejnerů, parkovací místa na parkovišti, osvětlení. V zemědělství k monitorování prostředí, napajedel. V dopravě a logistice k monitorování přepravníků kontejnerů. Uplatnění se nachází ve velmi široké oblasti použití. [6]

1.3.1 Architektura sítě

Technologie NB-IoT využívá již vybudované sítě LTE pro mobilní síť. Není nutné budovat oddělenou novou síť. Dosavadní síť stanic podporující LTE po aktualizaci softwaru vysílačů může sloužit i pro technologii NB-IoT. Využívané pásmo LTE pro mobilní síť využívá 4G a 3G síť. Pro IoT využití, je nevhodné, protože datové toky spotřebovávají příliš velké množství energie. To je způsobeno zejména odesíláním velkého množství dat pro zahájení nebo ukončení komunikace. Mobilní síť také mnohem častěji komunikují a udržují stále otevřená komunikační okna, která opět vedou k vyšší spotřebě energie.

Koncové zařízení odesílá data, která jsou přijímána bránami pro NB-IoT a dále přenášena pomocí LTE technologie na síťové servery. Poté jsou data odesílána do zákaznické aplikace. Architektura sítě je znázorněna na obrázku (Obrázek 1.12). [6]



Obrázek 1.12 - Architektura technologie NB-IoT, [6]

1.3.2 Protokol NB-IoT

NB-IoT využívá oboustranného přenosu dat bez omezení počtu odeslaných nebo přijatých zpráv. Maximální délka zprávy je omezena na 1280 bajtů. Přenosová rychlost je 50 kbps a samotný přenos dat je chráněn LTE šifrováním.[14]

1.3.3 Rádiový přenos NB-IoT

NB-IoT využívá licencované pásmo 7 MHz až 900 MHz, ale nosnou frekvenci pouhých 200kHz. Jelikož se jedná o využití mobilních sítí, každé zařízení musí obsahovat zabudovanou nebo externí SIM kartu, pomocí které může komunikovat se sítí.

Rádiový přenos je nasazen pro spektrum GSM, WCDMA nebo LTE. NB-IoT spočívá v úpravě přenosu dat stávajících metod a může využívat tři metody úpravy. Standalone, in-band nebo guard-band. [13][14]

• Standalone

První metoda využívá nahrazení operátora GSM nosičem NB-IoT. Ukázkou nahrazení zobrazuje obrázek (Obrázek 1.13). Protože GSM pracuje hlavně v pásmech již všude na trzích používaných na frekvencích 900MHz a 1800 MHz, je možné tento přístup velmi rychle nasadit a provozovat. [13][14]



Obrázek 1.13 - Standalone metoda, [13]

• In-band

Druhá metoda je nejefektivnější volbou pro nasazení skrz flexibilní využití části LTE nosiče. Do nosiče LTE je vložen NB-IoT signál. Obrázek (Obrázek 1.14) zobrazuje vložení NB-IoT signálu do LTE nosiče. Nasazení in-band metody do provozu je nejvhodnějším řešením s nízkými náklady. Možnost využívání části LTE nosiče výrazně odlišuje NB-IoT od ostatních LPWA technologií.

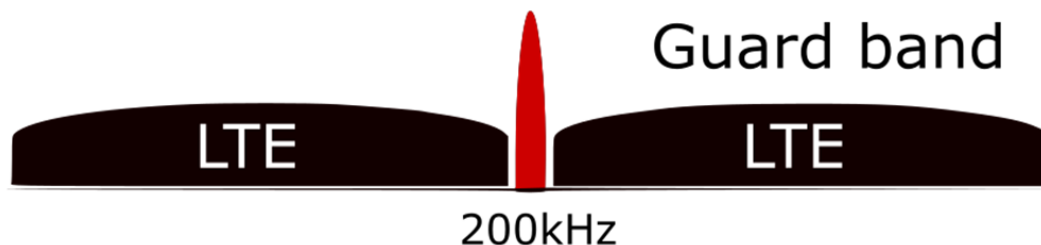


Obrázek 1.14 - In-band metoda, [13]

Jedna takto vložená buňka podporuje hustotu nasazení až 200 000 NB-IoT zařízení, určených pro běžné použití. V případě nedostačující kapacity je možné přidat více nosičů NB-IoT signálu. [13][14]

- **Guard band**

Třetím alternativní metodou je Guard band. Jde o princip nahrazení ochranného pásma NB-IoT pásmem. Na obrázku (Obrázek 1.15) můžeme vidět provedené nahrazení. Pro downlink se využívá OFDMA a pro uplink SC-FDMA přístup. Guard band využívá subnosnou frekvenci 15 kHz ve vzestupném a sestupném směru. [13][14]



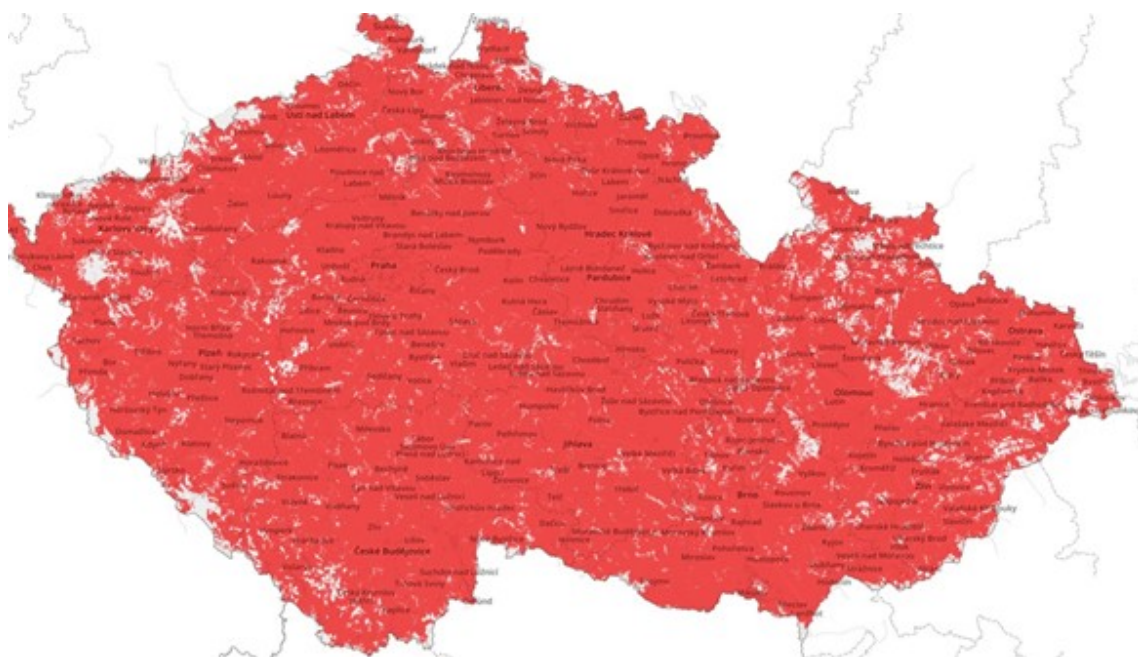
Obrázek 1.15 - Guard band metoda, [13]

1.3.4 Pokrytí signálem

V současné době tato síť pokrývá celou českou republiku venkovním signálem a 94% populace signálem i uvnitř budov. Českou republiku pokrývají signálem dva operátoři, Vodafone a O₂. K pokrytí se postupně přidávat i operátor T-Mobile. Celkové pokrytí signálem České republiky operátoři Vodafone a O₂ je 99%. Obrázek (Obrázek 1.16) a (Obrázek 1.17) zobrazuje pokrytí signálem operátoři Vodafone a O₂. [6]



Obrázek 1.16 - Pokrytí České republiky signálem LTE, operátor Vodafone, [6]



Obrázek 1.17 - Pokrytí České republiky signálem LTE, operátor 02, [6]

1.4 IQRF

Tato technologie se od tří předchozích velmi liší. Jejím cílem není zdolávat velké vzdálenosti, ale zaměřuje se na přenos menšího množství dat na kratší vzdálenosti s minimální spotřebou elektrické energie. Maximální dosah se udává 500m na volném prostranství za použití integrované antény. V případě využití externí antény je možné dosáhnout větších vzdáleností. Udávaná vzdálenost je spíše teoretická, v zastavěné ploše s vyskytujícím se rušením, bude podstatně menší. Komunikace pomocí této technologie je obousměrná bez omezení počtu odeslaných zpráv.



Obrázek 1.18 - Logo IQRF, [1]

IQRF technologie byla vyvinuta českou společností Microrisc s.r.o., která se postupně prosazuje i v zahraničí. Společnost IQRF Alliance, patřící pod Microrisc s.r.o., zajišťuje podporu pro patentovanou technologii IQRF. [17]

1.4.1 Rádiový přenos

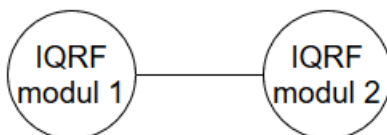
Technologie je realizována na bezlicenčním pásmu 868 MHz, 916MHz nebo 433MHz. Při využití frekvence 868 MHz, která se v Evropě využívá, je možné provozovat 62 kanálů. Jejich šířka pásma je 100kHz. Na frekvenci 916MHz až 189 kanálů a na frekvenci 433MHz pouze 16 kanálů. Rychlost přenášení dat může být 19,836kb/s nebo 19,2kb/s. Vysílací výkon je nastavitelný v osmi krocích od 3,5mW až po maximálně 12,5mW. Vysílací výkon je také možné nastavit automaticky, kdy si modul podle možnosti sítě sám omezí výkon, aby snížil svou potřebu při vysílání. [15][17]

1.4.2 DPA protokol

IQRF komunikuje pomocí paketů. Maximální velikost užitných dat jednoho paketu je 64 bajtů. Délka paketu udává čas, jak dlouho bude jedna zpráva odesílána. Pokud se využívá topologie typu MESH, popsaná v odstavci níže, čas odesílání se násobí počtem modulů, přes které musí projít. Pokud vyžadujeme odpověď, bude čas dvojnásobný, protože musíme započítat i cestu zpátky. [16][17]

1.4.3 Architektura sítě

IQRF technologii je možné využívat ve dvou režimech. Bez vybudování sítě nebo s vybudováním sítě. První možnost bez sítě využívá komunikace peer-to-peer, kdy zařízení vysílá pakety pro všechny zařízení v dosahu signálu. V tomto případě nejsou podporovány žádné síťové funkce, jako je například směrování dat. Podporováno je pouze jednoduché adresování. Obrázek (Obrázek 1.19) zobrazuje první variantu bez sítě.

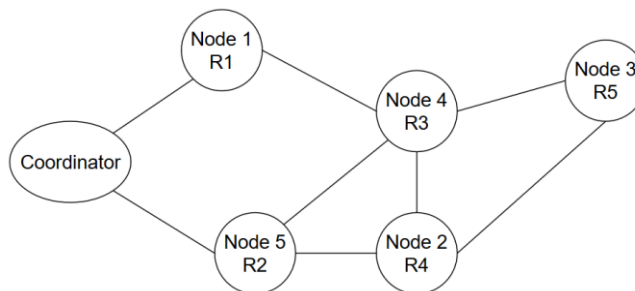


Obrázek 1.19 - IQRF komunikační režim bez sítě, peer to peer

Druhá možnost se sítí využívá jeden modul v režimu koordinátor a zbylé moduly v režimu node. Každý modul může být koordinátorem nebo nodem, vše závisí pouze v nahrané konfiguraci v daném modulu. Koordinátor spravuje celou síť, která může být tvořena až 239 uzly a jedním koordinátorem. Také určuje, jak a kudy budou data přenášena. Pakety v síti jsou dostupné pouze pro dané uzly v síti. Nejlepší metodou je využití IQMESH protokolu.

V IQMESH síti jsou datové pakety doručovány pomocí směrovacího mechanismu, který data ke koncovému nodu přeposílá přes ostatní nody, pokud koncový nod není přímo v dosahu koordinátora. Tato metoda je velmi robustní s vysokou spolehlivostí odeslání a příjmu dat. Opravuje nedostatky topologie sítě hvězda. Tento IQMESH protokol je již vestavěn v IQRF operačním systému. I přes velkou robustnost a jedinečnost patentovaných funkcí je implementace velmi jednoduchá. V této síti se může nacházet maximálně 240 zařízení. V případě nutnosti využití více zařízení, je možné vybudovat další síť. Každé zařízení může být součástí dvou nezávislých sítí.

Na obrázku (Obrázek 1.20) je vyobrazena IQMESH síť. Před zprovozněním sítě musí být síť nejprve zmapována, aby bylo možné data odesílat do koncových modulů co nejsnadnějším způsobem. Moduly nacházející se v cestě mezi koordinátorem a koncovým nodem, datový paket přijmou a přepošlou dál, pokud je paket určen pro nody dále v síti. Jednotlivé nody opakují signál ve svých časových intervalech, aby se zabránilo kolizi při komunikaci. Ideálním případem je, když se každé zařízení nachází v dosahu dvou a více zařízení. Pokud mezi dva nody vznikne překážka, datový paket k nodu za překážkou doputuje jinou cestou bez překážky. Mapování sítě probíhá automaticky pomocí tlačítka „Discovery“, kdy stačí tuto funkci pouze spustit a počkat než se automaticky celá síť zmapuje. [16][17]



Obrázek 1.20 - IQMESH síť technologie IQRF, [17]

1.4.4 Bondování

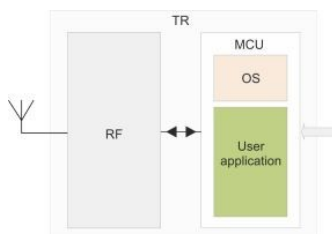
Jednotlivé moduly je nutné přidat do sítě pomocí přibondování. To je možné provést několika způsoby. Jednou z možností je modul ručně přibondovat pomocí tlačítka, které zapříčiní změnu napětíové úrovně na bondovacím pinu modulu. Další často používanou možností je přibondování modulu vzdáleně tak, že se nejprve vyčtou bondovací informace z modulu, které se následně zapíší do koordinátora a modul se takto přibonduje vzdáleně. Tato možnost je vhodná pro rozsáhlejší síť, nebo v místech, kde jsou jednotlivé nody na těžko přístupných místech, nebo uzavřeny v krabičkách. [16]

1.4.5 Operační systém

Operační systém využívá dvouvrstvou architekturu IQRF. V první vrstvě je nahrán již od výroby operační systém. Ten je v případě potřeby možné kdykoli přehrát. Druhou vrstvou je uživatelská aplikace, která je ale podřazena operačnímu systému a funguje pod jeho kontrolou. Operační systém obsahuje několik užitečných funkcí jako je časování, správu napájení, přístup k I/O pinů a mnoho dalšího.[16]

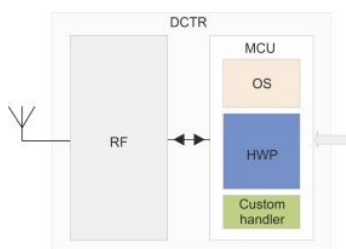
1.4.6 Aplikační přístup

IQRF moduly nabízí dva způsoby programování. Programování přímo pod operačním systémem, kdy si uživatelskou aplikaci píše sám uživatel v jazyce C. IQRF na svých stránkách poskytuje řadu návodů a postupů pro různé funkce jako je například PWM. Funkčnost modulu je poté plně závislá na uživatelské aplikaci. Tento přístup není podporován sítí IQMESH. Obrázek (Obrázek 1.21) znázorňuje aplikační přístup s programováním.[16]



Obrázek 1.21 - Aplikační přístup s programováním v jazyce C, přímo pod OS, [16]

Druhým aplikační přístup je bez programování podle DPA handler. Ovládání probíhá pouze tokem dat. V tomto případě programování není nutné, ale je možné. Místo kódu se využívá připraveného HWP. Přístup je volitelně programovatelný pomocí uživatelského obslužného programu DPA. Tento přístup jako jediný podporuje využití sítě IQMESH. Obrázek (Obrázek 1.22) znázorňuje aplikační přístup bez programování, podle DPA.[16]



Obrázek 1.22 - Aplikační přístup bez programování, podle DPA, [16]

1.4.7 IQRF brána

V předchozích odstavcích byla popisována pouze komunikace mezi jednotlivými moduly. Aby bylo možné data využívat pro IoT účely, je nutné zřídit IQRF bránu, která se stará o přeposílání dat do internetové sítě. IQRF bránu je možné zakoupit již hotovou nebo postavit si vlastní pomocí připojení IQRF koordinátora například k mini počítači Raspberry Pi. Ten se postará o předání dat z IQRF koordinátora dále do internetové sítě. Případně může sloužit i jako samotný server bez připojení k internetu, pokud je vyžadován ostrovní systém bez připojení k internetu. Samotná spotřeba jednotlivých modulů je velmi malá. Provozování vlastní IQRF brány vede k nutnosti napájení dalšího zařízení, s kterým je nutné počítat a celková spotřeba celého systému IQRF se tedy výrazně zvýší. [16]

1.4.8 Režimy provozu

Technologie IQRF umožňuje využívat nody ve třech režimech. Volba režimu silně ovlivňuje spotřebu elektrické energie. Prvním nejméně úsporný režim je STD. Ten se nejčastěji využívá u zařízení napájených ze sítě, kde není kladen důraz na spotřebu elektrické energie. Další možností je LP režim, který je vhodný pro zařízení napájené z baterie. Spotřeba energie v tomto režimu je výrazně nižší, ale pakety jsou delší a směrování přibližně dvojnásobně pomalejší. Posledním režimem je XLP, který je energeticky nejúspornější. [16][17]

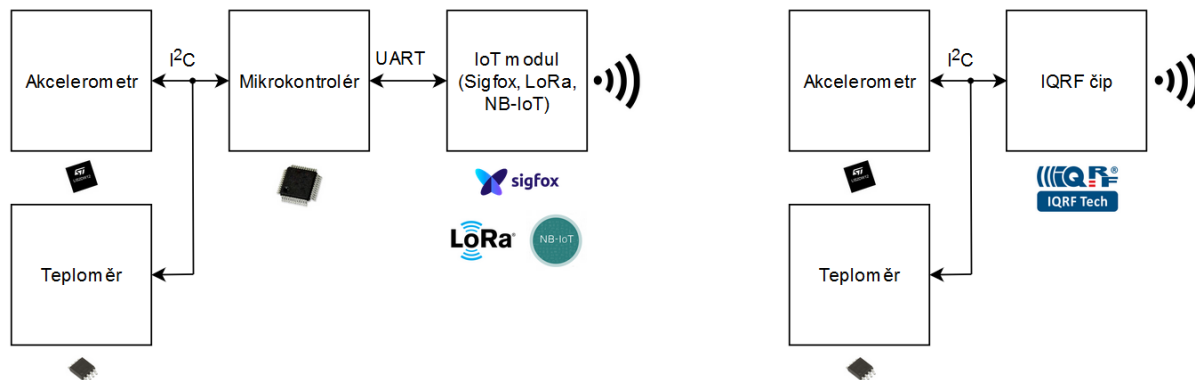
2 Návrh HW

Tato kapitola se zabývá návrhem a realizací hardwaru měřicího systému. Celé zařízení je navrhováno tak, aby bylo možné jednoduše vyměnit komunikační modul a využívat tak odlišnou IoT technologii. Díky tomuto návrhu, je zařízení modulární.

Pro měření stability budovy je využit tříosý akcelerometr, osazen na základní desce. Dále je základní deska osazena digitálním teploměrem pro měření teploty uvnitř krabičky. Zařízení je napájeno baterií, kterou dobíjí solární panel pomocí dobíječe. O chod celého zařízení se stará mikrokontrolér na základní desce při využití IoT technologií jako je Sigfox, LoRa nebo NB-IoT. V případě IQRF technologie IoT modulu, se o chod stará samotný čip IQRF a procesor na základní desce není osazen.

2.1 Blokové schéma měřicí a komunikační části

Zařízení je konstruováno v závislosti na použité IoT technologii. Obrázek (Obrázek 2.1) zobrazuje blokové schéma zapojení. Vlevo pro první tři IoT technologie (Sigfox, LoRa, NB-IoT). Vpravo pro IoT technologii IQRF. Zařízení je konstruováno tak, aby bylo možné výměnou, využívat i jiných IoT technologií jako je například Bluetooth nebo Wifi. Z toho důvodu má mikrokontrolér vyvedenou I²C sběrnici, UART komunikační linku i SPI sběrnici a další některé piny. Vyvedeny jsou všechny tyto komunikační rozhraní, aby bylo zařízení co nejuniverzálnější a umožňovalo změnou softwaru a změnou IoT modulu komunikovat i s jinými moduly. Pokud není nutné využívat mikrokontrolér, například při využití IQRF modulu, mikrokontrolér nebude osazen a vyčítání hodnot ze senzorů nebo měření napětí baterie bude realizováno právě přes patičku pro IoT modul.



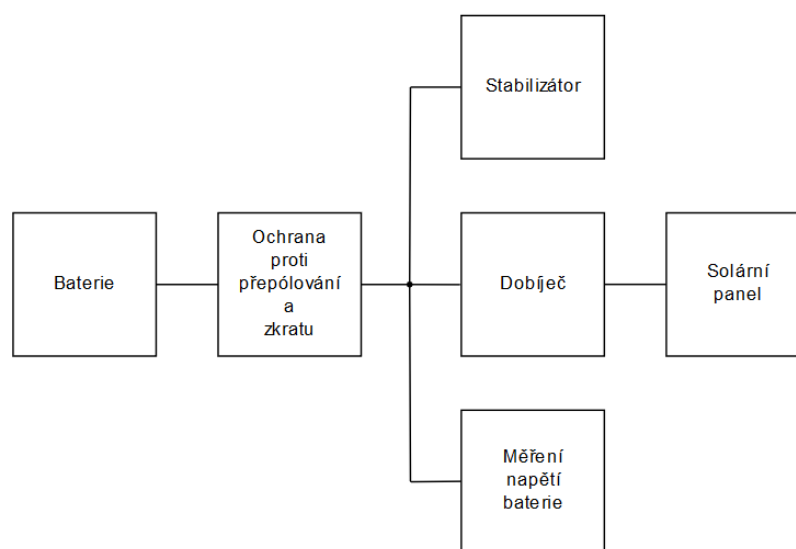
Obrázek 2.1 - Blokové schéma datové části, (vlevo Sigfox, LoRa, NB-IoT, vpravo IQRF)

K mikrokontroléru nebo IQRF čipu jsou připojeny dva senzory přes I²C sběrnici. Každý senzor má hardwarově nastavenou jinou adresu, aby nedošlo ke kolizi na sběrnici. V případě využití mikrokontroléru a IoT modulu, komunikační spojení je realizováno pomocí UART komunikační linky. V případě IQRF je funkce mikrokontroléru zastoupen pouze jedním čipem, který vše obstarává.

2.2 Blokové schéma napájecí části

Napájecí část napájějící integrované obvody a pomocné součástky, je tvořena baterií, ochranou proti přepólování a stabilizátorem, stabilizující napájecí napětí na hodnotu 3,3 V. Napětí baterie je měřeno, aby bylo možné zjišťovat její aktuální stav nabití nebo vyhodnotit charakteristiku vybíjení, či nabíjení. Díky tomuto měření je možné zjistit, jestli je baterie dostatečně dobíjena nebo jestli je její kapacita dostačující pro

pokrytí energetické spotřeby zařízení, mezi jednotlivými dobíjecími cykly. V případě zjištění nějakého problému, bude baterii nejspíše nutné externě dobít, případně vyměnit za jinou. O dobíjení baterie se stará dobíječ, který baterii dobíjí z energie, dodávané solárním panelem. Obrázek (Obrázek 2.2) zobrazuje propojení jednotlivých bloků napájecí části zařízení. Zařízení je schopno pracovat i bez dobíječe a solárního panelu po době než se baterie vybijí. Taktéž je možné baterii nahradit externím napájecím zdroje a provozovat tak zařízení v bezbateriovém provozu. Napětí externího zdroje nesmí ovšem překročit maximální vstupní napětí použitého stabilizátoru. Zařízení je také možné provozovat i s vyřazením celé napájecí části, včetně stabilizátoru, přivedením stabilizovaného napětí o hodnotě 3,3 V za stabilizátor. Například přes programovací konektor. V tomto případě již není zařízení nijak chráněno proti zkratu, nadproudu nebo přepólováním.



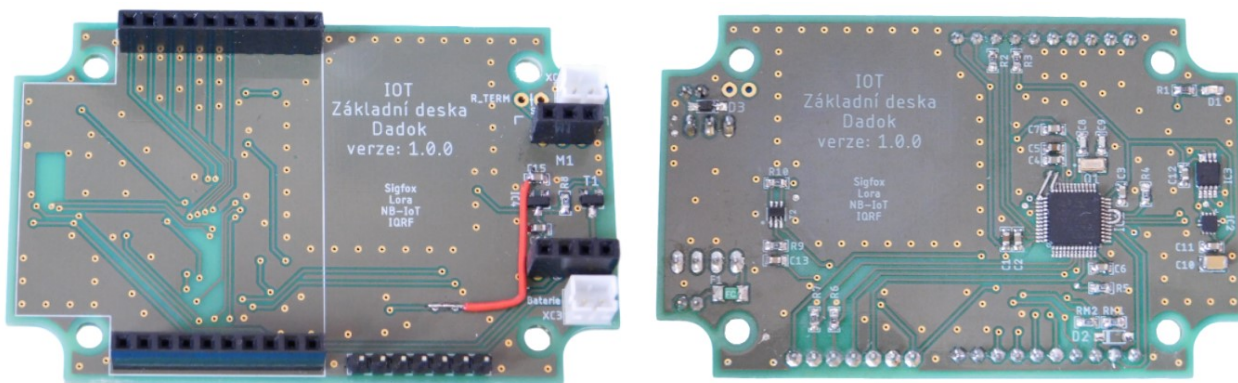
Obrázek 2.2 - Blokové schéma napájecí části

2.3 Použitý hardware

V této kapitole je popisován veškerý použitý hardware, včetně jeho parametrů a vlastností. Všechny IoT moduly, senzory a ostatní použité součástky.

2.3.1 Základní deska

Na obrázku (Obrázek 2.3) můžeme vidět celou základní desku. Vlevo pohled shora, vpravo pohled zespod. První verze základní desky obsahovala drobné chyby. Protože chyby nebyly příliš obtížné na opravu, navrhl jsem novou verzi základní desky, ale na prototyp využil první verzi, kterou jsem jen upravil. Jak můžeme i na obrázku (Obrázek 2.3) vlevo vidět, chyběla hlavní napájecí cesta vedoucí od stabilizátoru napětí, k veškerým součástkám, která je nahrazena červeným drátem. Další chybou bylo stejné hardwarové zvolení adres obou senzorů. Z tohoto důvodu byla adresa teploměru upravena z hodnoty 0x18 na hodnotu 0x19. Oprava spočívala v proškrábnutí cesty adresovacího pinu a nahrazením cínovým zkratem s vedlejším vývodem teploměru. Takto se na adresovací pin přivedlo napájecí napětí, místo původního uzemnění. Poslední hlavní úpravou, bylo přemostění UART rozhraní, na UART podporující LP provoz. Tato úprava byla provedena zejména z důvodu snížení energetické spotřeby zařízení. V druhé verzi byla pozice indikační LED společně s předřadným rezistorem, přesunuta z vrstvy bottom do vrstvy top, pro výraznější indikaci.



Obrázek 2.3 - Základní deska s osazeným mikrokontrolérem

2.3.2 Sigfox modul

Pro Sigfox komunikaci byl vybrán jeden z nejmenších a nejlevnějších, modul WSSFM10R1AT v SMD provedení. Určený pro provoz v Evropě v pásmu RCZ1.

Tabulka (Tabulka 2.1) níže znázorňuje označení modulu a jeho dekódování. Nejprve je v označení zakódován výrobce, následuje aplikace využití, typ, skupinové číslo, kód regionu a zakončen je použitím.

Tabulka 2.1 - Označení Sigfox modulu WSSFM10R1AT, [18]

| W | S | S | F | M | 1 | 0 | R | 1 | A | T |
|------------|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) |
| (1), (2) | | WS = výrobce WISOL | | | | | | | | |
| (3), (4) | | SF = Sigfox | | | | | | | | |
| (5) | | M = modul | | | | | | | | |
| (6), (7) | | 10 = skupinové číslo modulu | | | | | | | | |
| (8), (9) | | R1 = kód regionu | | | | | | | | |
| (10), (11) | | AT = verze využívající AT příkazy | | | | | | | | |

Modul obsahuje Sigfox komunikační část a procesor, díky kterému se s modulem komunikuje přes UART rozhraní pomocí AT příkazů. AT příkazy velmi zjednodušují komunikaci s modulem a lze modul takto plně ovládat. Modul také umožňuje využít SPI komunikační rozhraní, sdílené s GPIO piny.

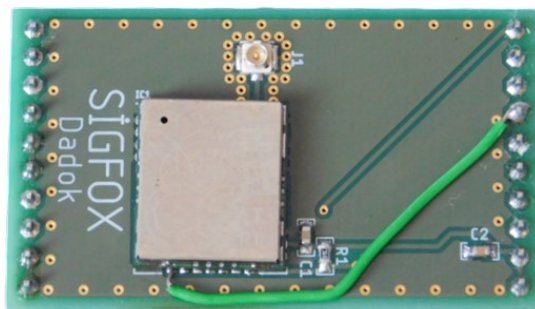
Tabulka 2.2 - Sigfox, základní údaje modulu WSSFM10R1AT, [18]

| Sigfox modul WSSFM10R1AT | | |
|---|----------------------|-------------|
| Napájecí napětí | 1,8 V až 3,6 V | |
| Proudový odběr při napájecím napětí 3,3 V | vysílání | 65 mA |
| | příjem | 15 mA |
| | režim spánku | 2 μ A |
| Frekvence | vysílání | 868,130 MHz |
| | příjem | 869,525 MHz |
| Rozměry | 13mm x 15mm x 2,21mm | |

Tak jako veškerá elektronika napájena 3,3 V, je i Sigfox modul napájen totožným napětím, které je pro něj neoptimálnější. V tabulce (Tabulka 2.2) můžeme vidět základní údaje modulu. Maximální udávaný proudový odběr při napětí 3,3 V je 65 mA, při vysílání zprávy. Proudový odběr, když je modul v režimu spánku, se udává 2 μ A. Po většinu času je ale modul v režimu spánku a probouzí se pouze pro vyslání zprávy, jen na pár sekund. Proto jeho spotřeba je minimální a je vhodný pro LP aplikace.

Zapojení modulu vychází z katalogového zapojení, kde je na patici IoT modulu vyvedena UART komunikační linka pro ovládání modulu AT příkazy a resetovací pin pro případný reset modulu, který je opatřen pull-up rezistorem. V těsné blízkosti Sigfox modulu je umístěn blokovací kondenzátor pro vykrývání proudových špiček zejména při zahájení vysílání.

Na obrázku (Obrázek 2.4) můžeme vidět Sigfox IoT modul. Při prvním návrhu bylo opomenuto hardwarové probouzení čipu. Aby nebylo nutné vyrábět novou desku plošného spoje, bylo chybějící propojení dodatečně zrealizováno přidáním vodiče, propojující probouzeč pin Sigfox modulu, s volným pinem patice IoT modulu. Při této úpravě byla zachována první verze DPS, ale bylo nutné posunout samotný čip Sigfox o desetiny milimetru blíže ke konektoru tak, aby ještě nedošlo k vyzkratování plošek po bocích čipu. Nepatrný posun odkryl částečně pájecí plošku pinu pro probuzení, ke které byl opatrně připájen vodič.



Obrázek 2.4 - IoT modul Sigfox

Modul je od výrobce předurčen pro využívání s externí anténou. Proto je na DPS umístěn konektor pro připojení externí antény. Díky které bude zaručen dostatečný signál. Podle oblasti použití, bude zařízení vybaveno vhodnou anténou.

2.3.3 LoRa modul

Komunikaci pomocí IoT technologie LoRa zastupuje modul RN2483. Jedná se modul zahrnující komunikační LoRa část a mikrokontrolér. Ten se stará o zpracování příkazů přijímaných přes komunikační rozhraní a obsluhu RF části LoRa. V rámci zachování stejné komunikační linky se všemi IoT moduly, je i tento modul řízen příkazy, přes UART rozhraní. SPI rozhraní nebo I²C sběrnice, zůstávají nevyužity.

Tabulka (Tabulka 2.3) zobrazuje základní parametry modulu. Uvedeny jsou maximální spotřeby elektrické energie při napájecím napětí 3,3 V, zároveň při nastaveném nejsilnějším možném vysílání. Modul je jako veškerá elektronika zařízení napájen napětím o hodnotě 3,3 V. Oproti ostatním IoT komunikačním modulům je tento LoRa modul největší, proto byla výsledná velikost DPS zvětšena. Zvětšení se netýká celé části desky, ale jen levé části, protože vpravo musí zůstat volné místo pro anténní konektor přišroubovaný ke krabici.

Tabulka 2.3 - Základní parametry modulu RN2483, [19]

| LoRa modul RN2483 | | |
|---|-----------------------------|-------------|
| Napájecí napětí | 2,1 V až 3,6 V | |
| Proudový odběr při napájecím napětí 3,3 V | v nečinnosti | 2,8 mA |
| | vysílání (f = 866MHz) | 38,9 mA |
| | režim spánku | 1,6 μ A |
| Rozměry | 17,8 mm x 26,7 mm x 3,34 mm | |

Zapojení vychází z katalogového zapojení, kde jsou k samotnému modulu připojeny dva blokové kondenzátory, pro zlepšení stability napájení a pokrytí proudových špiček, zejména při vysílání. Na patici IoT modulu je vyvedena pouze UART komunikační linka a resetovací pin, který je doplněn o pull-up rezistor. Tento pull-up rezistor zajišťuje logickou jedničku na resetovacím pinu v případě, kdy na něj není přivedena žádná logická hodnota a takto udržuje reset neaktivní. Zbylé piny modulu jsou z důvodu nepotřebnosti nevyvedeny, protože modul je využíván pouze ke komunikaci a nikoliv k využívání GPIO pinů, které nabízí k libovolnému využití.

Modul obsahuje dva výstupy na externí anténu. Jeden pro vysílání na frekvenci 433 MHz, která není využita, protože je vhodná spíše pro použití mimo Evropu. Druhý výstup slouží pro připojení externí antény pracující na frekvenci 868 MHz, ke kterému je již připojen konektor pro externí anténu. Tento výstup je využit, protože v Evropě, kde zařízení bude pracovat, se využívá právě tato frekvence k přenosu dat. Na obrázku (Obrázek 2.5) můžeme vidět osazený IoT modul LoRa. Na první verzi této desky nebyly zjištěny žádné problémy nebo nedostatky, proto je tato první verze považována za verzi finální.



Obrázek 2.5 - IoT modul LoRa

2.3.4 Lora brána

Lora brána ke své činnosti využívá platformu Raspberry PI model 2B a Lora modul iC880A s externí anténou. Modul slouží pro vytvoření LoRa sítě a komunikaci s koncovým zařízením. Platforma Raspberry Pi data zpracovává a odesílá dál na TTN server pomocí ethernetu. Minipočítač Raspberry Pi je s modulem propojen pomocí propojovacích vodičů, přes které modul komunikuje a je i napájen. Konstrukčně jsou obě desky i konektor externí antény spojeny pomocí plastových dílů vyrobených pomocí 3D tisku. Na obrázku (Obrázek 2.6) můžeme vidět sestavenou LoRa bránu. Takovéto nekryté provedení může sloužit pouze pro testovací účely nebo k využití v čistém prostředí v budově, kde nehrozí mechanické poškození nebo poškození atmosférickými vlivy.



Obrázek 2.6 - LoRa brána

• Raspberry Pi

Použitý model 2B je poslední verzi bez zabudované wifi technologie. Pokud wifi nevyžadujeme, je tato platforma nejvhodnější verzí, pro využití jako Lora brána. V případě potřeby připojení k internetu pomocí wifi, místo LAN kabelu, je možné LoRa bránu zkonstruovat například na platformě Raspberry Pi 3B+, ale je nutné počítat se zvýšenou spotřebou elektrické energie. Platformu je možné napájet pomocí GPIO pinů napětím 5 V nebo mini USB konektorem. Veškerá data a operační systém jsou uloženy na MicroSD paměťové kartě. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2.4).

Tabulka 2.4 - Základní parametry minipočítače Raspberry Pi model 2B, [22]

| Raspberry PI model 2B | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Napájecí napětí | 5 V |
| Procesor | 900 MHz čtyřjádrový ARM Cortex-A7 |
| Paměť SDRAM | 1GB (sdílená s GPU) |
| Rozhraní | I ² C, SPI, UART |
| Počet pinů | 40 |
| Interní paměť | MicroSDHC slot |
| Jmenovitý výkon | 4 W |
| Rozměry desky | 85,6 mm x 56,5 mm |

• LoRa modul iC880A

Modul iC880A umožňuje komunikovat až na osmi kanálech současně. S využitím externí antény bývá dosah signálu až 15 km. Napájecí napětí modulu je kompatibilní s napájením platformy Raspberry Pi, protože také vyžaduje napájecí napětí 5 V. S mini počítačem Raspberry Pi komunikuje modul, pomocí SPI komunikačního rozhraní, které musí být v Raspberry Pi povoleno. Základní parametry modulu jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2.5). Modul obsahuje několik LED, indikující činnost v LoRa síti, sloužící pro ladící účely.

Tabulka 2.5 - Základní parametry LoRa modulu iC880A, [23]

| LoRa modul iC880A | | |
|-------------------|-------------------|---------|
| Napájecí napětí | 4,5 V až 5,5 V | |
| Proudový odběr | střední aktivita | 276 mA |
| | vysoká aktivita | 433 mA |
| Výkon | vysílání | 20 dBi |
| | příjem | -15 dBi |
| Vysílací pásmo | 868 MHz | |
| Rozměry | 79,8 mm x 67,3 mm | |

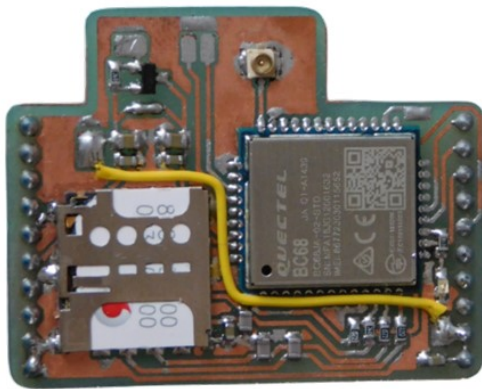
2.3.5 NB-IoT modul

Pro IoT komunikaci pomocí technologie NB-IoT byl vybrán čip BC68 vyráběný společností Quectel. Tento čip splňuje standardy pro provoz v Evropě. Napájecí napětí je minimálně 3,1 V, proto je kompatibilní s veškerou elektronikou, která je napájena napětím 3,3 V. Proudový odběr je závislý na režimu provozu. Maximální spotřeba elektrické energie může být špičkově až 220 mA. Základní parametry čipu jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2.6). Ovládání čipu je realizováno pomocí AT příkazů přes UART rozhraní.

Tabulka 2.6 - Základní parametry čipu BC68, [24]

| Quectel BC68 | | |
|---|---|-----------------|
| Napájecí napětí | 3,1 V až 4,2 V | |
| Proudový odběr při napájecím napětí 3,6 V | Spánek | 3 μ A |
| | Standby | 0,5 mA |
| | Vysílání (B20) | 70 mA až 220 mA |
| Vysílací výkon max | 23 dBm \pm 2 dBm | |
| Internetový protokol | IPv4/IPv6/UDP/CoAP/LWM2M/Non-IP/DTLS/TCP/MQTT | |
| Rozměry | 17,7 mm x 15,8 mm x 2 mm | |

Zapojení modulu vychází z doporučeného katalogového zapojení. Pro připojení datové SIM karty je na DPS umístěn slot pro mikroSIM kartu, co nejbližší Quectel čipu. Datové spoje mezi SIM a čipem jsou chráněny proti ESD pomocí keramických kondenzátorů o kapacitě 33 pF, na každé signálové cestě. Kondenzátory jsou umístěny tak, aby byly v přímé linii vedené cesty. Dále podle katalogového doporučení jsou všechny signálové cesty vedeny přes ochranné odpory, o hodnotě 22 Ω . K vodiči DATA byl dále přidán pull-up rezistor udržující vysokou logickou úroveň. Pro ladící účely je k čipu připojena indikační LED, indikující činnost v síti. Protože čip může být náročnější na proudový odběr, nachází se na desce filtrační a blokovací kondenzátory o hodnotách 10 μ F a 100 nF. Tato série dvou kondenzátorů se nachází přímo v blízkosti čipu. Stejná série se také nachází před spínacím tranzistorem, který umožňuje celý modul odpojit od napájení. Využit je MOSFET tranzistor typu P-Kaná. Deska je i připravena pro případ, kdy není nutné spínací tranzistor využívat. V tomto případě se místo tranzistoru, osadí DNP rezistor R7 propojkou. Na obrázku (Obrázek 2.7) je vyfocen modul NB-IoT již s vloženou SIM kartou.



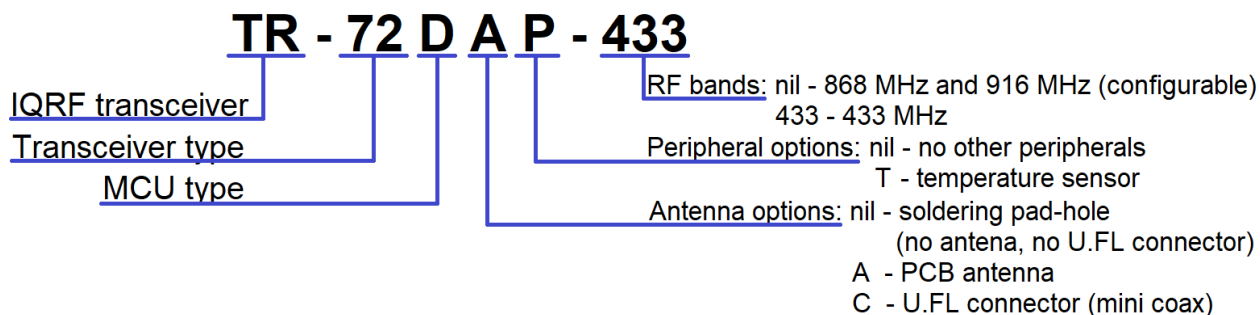
Obrázek 2.7 - NB-IoT modul

Návrh tohoto modulu je realizován pomocí jednostranného DPS pouze s dvěma drátovými propojkami. Jednostranný návrh je zvolen z důvodu výroby desky v domácím prostředí, protože zakázková prototypová výroba je časově zdlouhavá a cenově náročná. Pro jednoduchost zapojení je jednostranný návrh a výroba v domácích podmínkách, dostačující.

2.3.6 IQRF modul

Společnost Microrisc s.r.o. pro svou jedinečnou technologii vyrábí vlastní čipy. Čipy jsou vyráběny v řadách, vždy ve dvou rozdílných provedeních. Prvním provedením je IQRF modul, určen pro uchycení do SIM konektoru. Druhým je provedení s pájecími ploškami, určený pro zapájení na vlastní desku plošných spojů. Obě varianty se vyrábí se zabudovanou anténou nebo s možností připojení externí antény. Aktuálně nejnovější řadou v prodeji, jsou moduly červené řady TR-7XD. Nyní je již vyvíjena nová řada, která se brzy objeví na trhu.

Obrázek (Obrázek 2.8) zobrazuje dekódování označení IQRF modulu. První dvojice písmen TR znamená, že se jedná o vysílač. Dále za pomlčkou následuje typ vysílače, typ procesoru, typ antény, přítomnost senzoru a poslední označení udává vysílací frekvenci v případě interní antény.



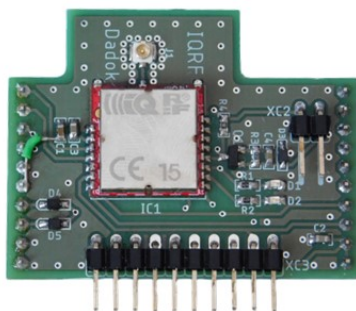
Obrázek 2.8 - Označení IQRF modulu, [16]

Vybrán byl IQRF čip červené řady, bez interní antény, aby bylo možné připojit větší anténu a dosáhnout v případě potřeby většího dosahu. Modul byl vybrán ve verzi, určené pro připájení do vlastního obvodu. V tabulce (Tabulka 2.7) jsou shrnuty základní parametry vybraného modulu.

Tabulka 2.7 - Základní parametry IQRF node, [16]

| IQRF node TR-76D | | |
|------------------|----------------------------|-----------------|
| Napájecí napětí | 3,0 V až 3,4 V | |
| Proudový odběr | Deep sleep mode | 56 nA |
| | Sleep mode | 610 nA |
| | Run mode – RF sleep | 1,6 mA |
| | Run mode – RF ready | 3 mA |
| | RX mode - STD | 11,8 mA |
| | RX mode - LP | 250 μ A |
| | RX mode - XLP | 16,3 μ A |
| | TX mode | 8,3 mA až 25 mA |
| A/D převodník | 4 vstupů, 10 bitový | |
| I/O piny | 11 | |
| EEPROM | 256 kB | |
| Vysílací výkon | 10 mW | |
| Rozměry | 15,2 mm x 14,9 mm x 3,3 mm | |

Zapojení využívá doporučeného návrhu dle katalogového zapojení. V přímé blízkosti IQRF čipu jsou lokální blokovací kondenzátory, vykrývající proudové špičky. K modulu jsou přes rezistory připojeny signalizační LED, sloužící pro indikaci stavu modulu, vhodné zejména pro bondování nebo přehrávání softwaru. Modul je připraven pro manuální bondování, které se provede vyzkratováním konektoru XC2 jumper propojkou. Zkratovací propojka není přímo připojena na pin modulu, ale bondovací signál je spínán MOSFET tranzistorem typu N-kanál, podle katalogového doporučeného zapojení. K pinu je připojen pull-up rezistor zajišťující logickou jedničku na pinu, pokud není zrovna prováděno bondování nebo není vyvolán alarm. Dále tento IoT modul obsahuje dvě diody, zajišťující sloučení dvou alarmových signálů v jeden. Tyto diody nahrazují OR hradlo. Protože IQRF modul pro vyvolání alarmového odeslání zprávy využívá jednoho pinu, musely být dva alarmové signály spojeny v jeden. Posledním komponentem IoT modulu je programovací konektor, sloužící pro přeprogramování IQRF čipu nebo ke změně jeho parametru. Programovací konektor je plně kompatibilní s originál IQRF programátory. Díky plné kompatibilitě, je možné modul přímo připojit k programátoru bez nutnosti využití jakéhokoli převodníku nebo speciálního kabelu. Na obrázku (Obrázek 2.9) můžeme vidět osazený IoT modul pro IQRF technologii.



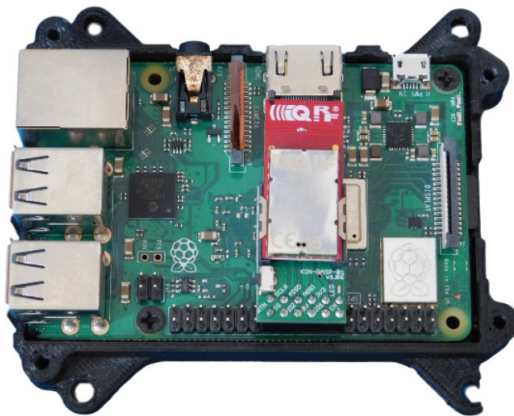
Obrázek 2.9 - IoT modul IQRF

První verze DPS měla přivedeny na rozpoznávací piny PIN1 a PIN2 přivedenou zem. Poté jsem se rozhodl změnit adresaci z 00 na 11. Proto musela být dutinková lišta odstraněna, uzemňovací cesta přerušena, poté opět dutinková lišta osazena a přivedeno na tyto piny napájecí napětí. Nejbližší cestou vedení napájecího napětí, bylo napojení se na blokovací kondenzátor a pull-up rezistor. Po této úpravě, je již druhá verze desky považována za finální verzi.

2.3.7 IRQF brána

IRQF brána využívá raspberry PI, model 3B+ a IRQF čip. Pro IRQF bránu jsem využil modul již s integrovanou anténou, protože bránu používám na testování s IRQF nody v malé vzdálenosti a není tedy potřeba využít silnější antény. IRQF čip je k raspberry připojen pomocí SPI rozhraní. Čip je zasunut do redukce KON-RASP přímo určené pro spojení IRQF čipu s minipočítačem raspberry.

Zrealizovat IRQF bránu, by bylo možné i na raspberry modelu 2B, stejném jako využívá Lora brána. Model 3B+ již obsahuje bluetooth a wifi, který ovšem není nutné využívat. Novější model jsem využil proto, jelikož jsem jej již tento model vlastnil a nemusel tak kupovat starší model. Na obrázku (Obrázek 2.10) se nachází IRQF brána.



Obrázek 2.10 - IRQF brána

2.3.8 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je základem celého zařízení, při využití IoT technologie Sigfox, Lora a NB-IoT. Vybrán byl čip STM32L083CZT6. Jedná se ultra-low-power 32-bitový čip, vhodný pro využití s IoT technologiemi. Základní parametry čipu jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2.8).

Tabulka 2.8 - Základní parametry mikrokontroléru STM32L083CZT6, [24]

| STM32L083CZT6 | | |
|-----------------|--|--------|
| Napájecí napětí | 1,65 V až 3,6 V | |
| Paměť | Flash | 192 kB |
| | RAM | 20 kB |
| | EEPROM | 6 kB |
| AD převodník | 12-bit | |
| Rozhraní | 6 x SPI, 3 x I ² C, 4 x UART, 1 x USB 2.0 | |
| Frekvence | 32 MHz, 16 MHz, 4,2 MHz | |

2.3.9 Modul dobíječe

Pro dobíjení baterie byl vybrán modul dobíječe, využívající čip LT3652EMSE#PBF. Obrázek (Obrázek 2.11) vyobrazuje osazený modul dobíječe. Modul jsem sám nenavrhol, ale využil již osvědčeného návrhu využívaného v zařízeních s IoT technologiemi.



Obrázek 2.11 - modul dobíječe LT3652EMSE#PBF

Tento čip je určen k dobíjení baterií ze solárního panelu. Výkon solárních panelů je velmi závislý na jeho zatížení. Pokud je panel přetížen, jeho výkon klesá k nule a nemůže dostatečně dobíjet baterii. Využívaný čip zatížení solárního panelu reguluje tak, aby ho využíval co nejefektivněji a odebíral z něj co největší možný výkon. Modul dobíječe je nastaven pomocí odporového děliče, obsaženém přímo na modulu, na napětí 4,2 V, což je optimální pro dobíjení Li-pol nebo Li-ion baterie. Maximální nabíjecí proud je omezen na hodnotu 330 mA, aby se baterie při nabíjení příliš nezahřívala a její nabíjení bylo šetrné. Základní parametry čipu můžeme vidět v tabulce (Tabulka 2.9) níže.

Tabulka 2.9 - Základní parametry čipu LT3652EMSE#PBF, [26]

| Čip LT3652EMSE#PBF | |
|---|----------------|
| Vstupní napájecí napětí | 4,95 V až 32 V |
| Maximální nabíjecí proud | 2 A |
| Přesnost plovoucího referenčního napětí | 0,5 % |
| Přesnost nabíjecího proudu | 5 % |
| Přesnost detekce C/10 | 2,5 % |
| Spínací frekvence | 1 MHz |

2.3.10 Baterie

Celé zařízení napájí baterie typu Li-pol o jmenovitém napětí 3,7 V, vyobrazené na obrázku (Obrázek 2.12). Při plném nabití může její hodnota napětí dosahovat až 4,2 V. Kapacita baterie je 2000 mAh. Celková kapacita baterie se uvádí 7,4 Wh. Baterie již obsahuje kabely s konektorem, díky čemuž ji je možné přímo připojit, do základní desky zařízení. Velikost baterie je přibližně 55 mm x 34 mm x 10 mm. Svým rozměrem dokonale vyplňuje prázdné místo v zařízení.



Obrázek 2.12 - Li-Pol baterie

2.3.11 Senzory

Zařízení využívá dva senzory. Jeden pro snímání zrychlení, přepočtem náklon budovy a druhý pro měření teploty. Oba senzory komunikují pomocí I²C sběrnice. V tabulce (Tabulka 2.10) nalezneme přehledně jednotlivé adresy senzorů.

Tabulka 2.10 - I²C adresy senzorů

| I ² C adresy senzorů | |
|---------------------------------|------|
| Akcelerometr | 0x18 |
| Teploměr | 0x19 |

• Akcelerometr

Pro snímání zrychlení a úhlu naklonění budovy byl vybrán tříosý akcelerometr LIS2DW12TR. Jeho napájecí napětí je kompatibilní s úrovní 3,3 V, kterou je napájena veškerá elektronika. V tabulce (Tabulka 2.11) nalezneme základní parametry akcelerometru.

Zapojení senzorů vychází z katalogového zapojení, kde v těsné blízkosti je senzor doplněn o lokální filtrační kondenzátory, pro vyhlazení napětí a vykrývání proudových špiček.

Tabulka 2.11 - Základní parametry akcelerometru LIS2DW12TR, [21]

| Akcelerometr LIS2DW12TR | | |
|---|------------------------------|---------|
| Napájecí napětí | 1,62 V až 3,6 V | |
| Rozlišení: | 16 bit | |
| Citlivost: | ±2 g / ±4 g / ±8 g / ±16 g | |
| Komunikační rozhraní | I ² C | |
| Frekvence měření | 1,6 Hz až 1600 Hz | |
| Proudový odběr při napájecím napětí 1,8 V | HP mode ODR 12,5Hz až 1600Hz | 90 μA |
| | LP mode – ODR 100Hz | 5 μA |
| | LP mode – ODR 50Hz | 3 μA |
| | LP mode – ODR 12,5Hz | 1 μA |
| | LP mode – ODR 1,6Hz | 0,38 μA |
| | Power down mode | 50 nA |

• Teploměr

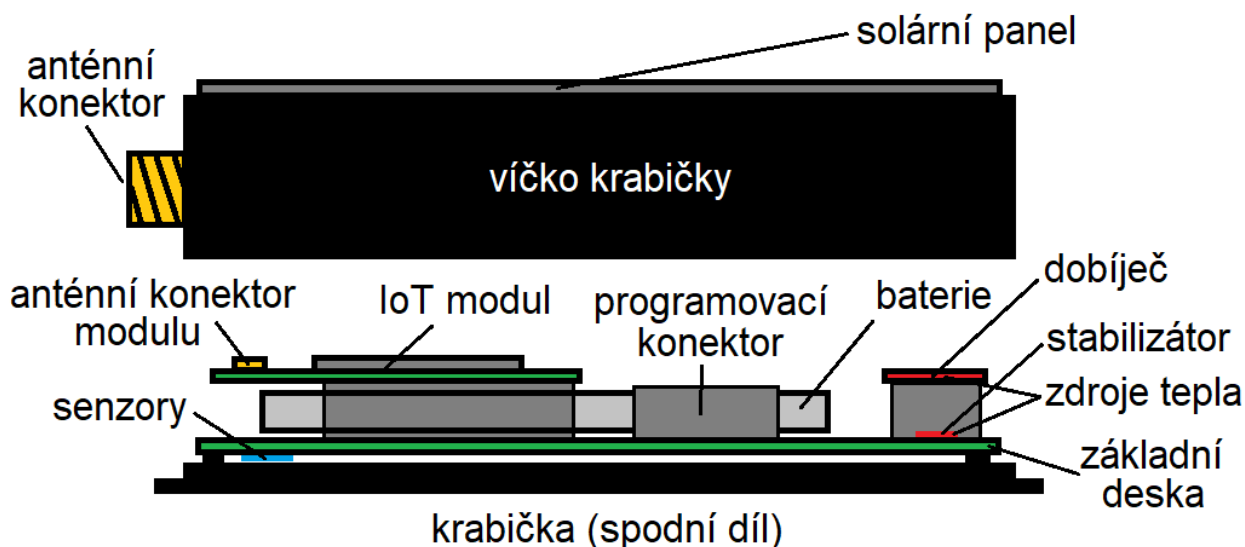
Pro měření teploty byl použit digitální teploměr MCP9808. Jeho maximální rozlišení je až 0,0625 °C/bit, což je více než dostačující, pro danou aplikaci použití. Napájecí napětí je také kompatibilní s úrovní 3,3 V. Tabulka (Tabulka 2.12) popisuje základní parametry teploměru.

Tabulka 2.12 - Základní parametry teploměru MCP9808, [20]

| Teploměr MCP9808 | | |
|---|------------------|--------------|
| Napájecí napětí | 2,7 V až 5,5 V | |
| Proudový odběr při napájecím napětí 3,3 V | měření | 200 μ A |
| | vypnutí | 0,1 μ A |
| Čas měření | 0,5 °C/bit | 30 ms |
| | 0,25 °C/bit | 65 ms |
| | 0,125 °C/bit | 130 ms |
| | 0,0625 °C/bit | 250 ms |
| Nepřesnost měření | -20 °C až 100 °C | $\pm 0,5$ °C |
| | -40 °C až 125 °C | ± 1 °C |

2.4 Konstrukční provedení

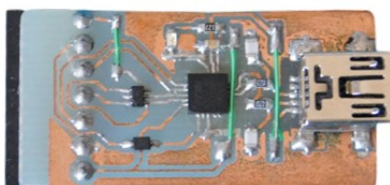
Konstrukce zařízení je navrhována tak, aby se vše vměstnalo, do krabičky HAMMOND 1591 M. Obrázek (Obrázek 2.13) zobrazuje mechanické uspořádání jednotlivých komponent celého zařízení. Na boční straně víčka je vyveden konektor pro externí anténu. Na vrchní straně víčka krabičky se nachází solární panel pro dobíjení interní baterie. Do dna krabičky je přišroubována základní deska, obsahující konektory po připojení IoT modulu, dobíječe, solárního panelu a baterie. Konektory jsou realizovány pomocí dutinkových lišt, které dobíječ a IoT modul nejen propojují se základní deskou, ale zároveň i mechanicky upevňují. Baterie se volně nachází mezi základní deskou a IoT modulem. Protože zařízení bude staticky připevněno na měřeném objektu, který se nepohybuje, nemusí být baterie pevně připevněna. Pro připojení baterie a solárního panelu byly použity konektory, umístěny vhodně vedle dobíječe. Vedle dobíječe se nachází také vývodový termistor pro měření teploty baterie, který bude připevněn přímo k tělu baterie, aby co nejlépe snímal její teplotu. Konektor pro externí anténu je k IoT modulu připojován pomocí anténní pigtail propojky, aby bylo jednoduše možné IoT modul zaměnit za jiný. Pro zlepšení těsnosti krabičky bylo přidáno mezi dno a víčko gumové těsnění. Těsnění bylo vymodelováno na míru a vytištěno z gumového materiálu TPE88 na 3D tiskárně. Tisk byl nastaven tak, aby těsnění bylo vytištěno jen z perimetrů nikoli z výplně, pro lepší těsnicí vlastnosti.



Obrázek 2.13 - Konstrukční uspořádání jednotlivých komponent zařízení, pohled z boku

Aby byly co nejméně teplotně ovlivňovány měřicí senzory, akcelerometr a teploměr (vyznačeny modře), nachází se na spodní straně základní desky vlevo. Zdroj tepla v podobě dobíječe při jeho činnosti nebo stabilizátoru se nachází co nejvíce vpravo, na vrchní straně základní desky (vyznačeno červeně). Dobíječ je navíc k základní desce připojen přes dutinkovou lištu, které přenos tepla eliminuje. Možné zdroje tepla se tedy nachází co nejdále od měřicích senzorů. Vzhledem k využívání nízko příkonových součástek s velmi nízkým odběrem elektrické energie s nízkou přeměnou energie v teplo, můžeme teplotní ovlivňování téměř zanedbat.

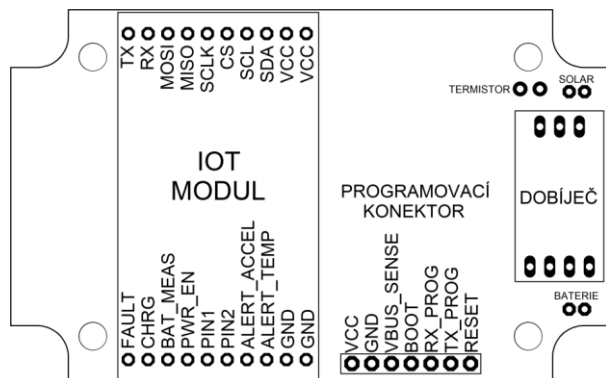
Na obrázku (Obrázek 2.15) můžeme vidět popis jednotlivých pinů konektorů. Programovací konektor obsahuje napájení a propojení s mikrokontrolérem. Vyvedeny jsou piny RESET, BOOT, VBUS_SENSE a sériová linka pro programování a debugování. Programátor byl vytvořen vlastní, využívající čip FT231XQ-R a pomocné součástky. První verze návrhu programátoru byla s využitím dvouvrstvého DPS. Protože výroba DPS firmou je časově zdlouhavá a cenově nákladná, vytvořil jsem druhou verzi jednostranné DPS, kterou jsem následně vyrobil v domácích podmínkách. Na obrázku (Obrázek 2.14) níže můžeme vidět hotový programátor s konektorem, umožňující přímé spojení se základní deskou.



Obrázek 2.14 - Programátor

Na konektor pro IoT moduly je vyvedeno napájení, které je pro lepší kontakt realizováno zdvojením, čímž je zaručeno lepší spojení. Horní část konektoru obsahuje tři základní komunikační rozhraní mikrokontroléru, v podobě I²C, SPI a UART rozhraní. Vyvedení více typů rozhraní zvyšuje modularitu a možnost využívat různé IoT moduly, případně jiné dodatečné moduly. I²C rozhraní slouží k vyčítání dat ze senzorů pomocí IQRF modulu. UART rozhraní se využívá k sériové komunikaci mikrokontroléru s IoT moduly ostatních technologií. Komunikační rozhraní SPI zatím není využito, ale využívá se jeho pinů jako běžný digitální pin, například pro reset IoT modů. Ve spodní části konektoru jsou vyvedeny piny FAULT,

CHRG, BAT_MEAS, PWR_EN, ALERT_ACCEL a ALERT_TEMP sloužící pro využití IQRF modulu, který obsahuje vlastní mikrokontrolér a musí tedy být se základní deskou propojen navíc pomocí těchto pinů.



Obrázek 2.15 - Základní deska, popis konektorů

Dále ve spodní části najdeme dva piny, PIN1 a PIN2, sloužící pro zjištění typu IoT modulu. Adresování je provedeno pomocí logických úrovní udávaných přímo IoT modulem. Tabulka (Tabulka 2.13) zobrazuje adresaci IoT modulů.

Tabulka 2.13 - Adresace IoT modulů

| IoT modul | PIN1 | PIN2 |
|-----------|------|------|
| Sigfox | 0 | 0 |
| LoRa | 1 | 0 |
| NB-IoT | 0 | 1 |
| IQRF | 1 | 1 |

Na obrázku (Obrázek 2.16) je vidět již zkonstruované zařízení v krabičkách. Pro lepší názornost mechanického uspořádání vevnitř krabičky, jsou dvě technologie vyfoceny s otevřeným víkem. Vlevo nahoře můžeme vidět technologii IQRF a vpravo dole, technologii LoRa.



Obrázek 2.16 - Sestavené zařízení (v krabičkách)

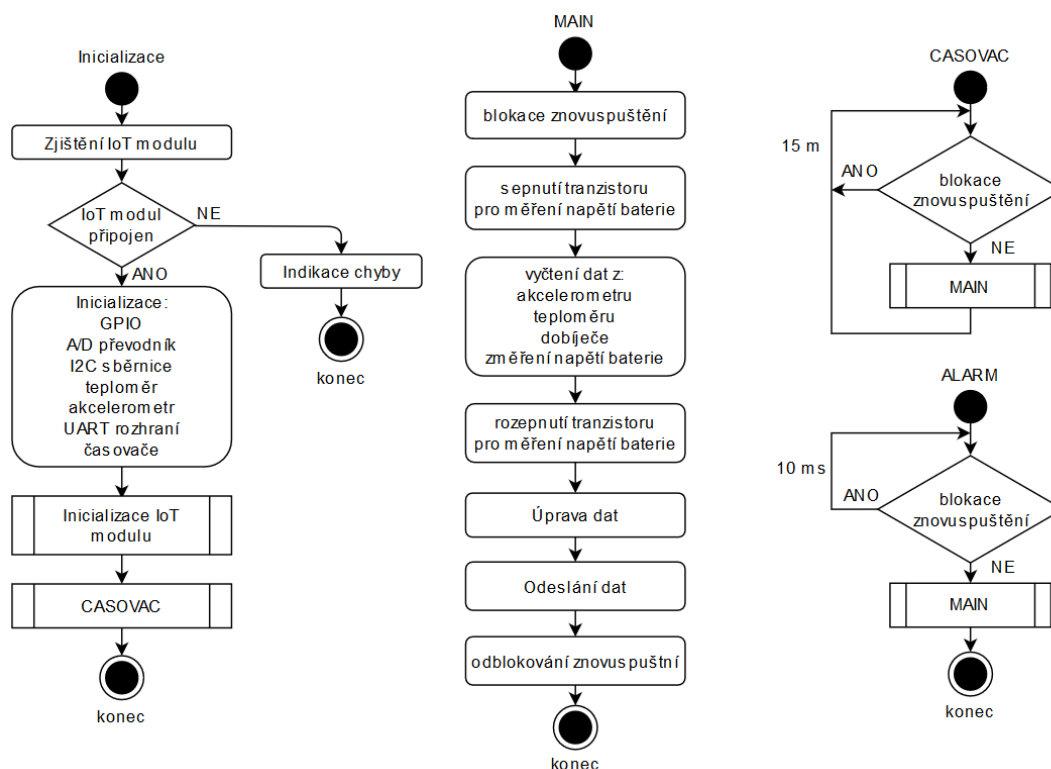
3 Návrh softwaru

Tato kapitola se zabývá popisem softwaru zařízení včetně konfigurace senzorů, a komunikaci s IoT moduly. Popisován je software mikrokontroléru i software čipu IQRF. Také je zde uvedeno prvotní nastavení IoT modulu před jejich využíváním. Program mikrokontroléru i IQRF čipu je obsažen v přílohách.

3.1 Software mikrokontroléru

Software byl vytvořen za pomoci vývojového prostředí „Visual Studio Code“ společně s využitím softwaru „BigClown Toolchain“, který se stará o kompilaci a přehrání Firmware mikrokontroléru. Celý program je zaměřen na nízkou spotřebu zařízení. Samotný mikrokontrolér byl vytvořen pro využití s IoT technologiemi s nízkou energetickou náročností. Při jeho programování není nutné řídit jeho režimy spotřeby, protože se sám, v rámci možností, přepíná do režimu s nejnižší spotřebou. Po většinu času mikrokontrolér je uspán a čeká na probuzení vnitřním časovačem, probuzení vyvoláním alarmu na pinech nebo probuzení po UART sběrnici IoT modulem.

Po zapnutí zařízení je spuštěna inicializace, ve které je nejprve zjištěn typ připojeného IoT modulu. Pokud není připojen žádný IoT modul, nebo IQRF modu, je pomocí indikační ledky signalizována chyba modulu a mikrokontrolér se navždy uspí. V tomto případě nedojde k další inicializaci, aby bylo možné využívat jeho periferie, jako jsou senzory, dobíječ nebo baterie. Nežádoucí spotřeba mikrokontroléru je tedy minimální, pro případný provoz základní desky s jiným IoT modulem, který mikrokontrolér na základní desce nevyužívá. Na obrázku (Obrázek 3.1) vlevo, můžeme vidět stavový diagram, kde inicializace se nachází vlevo. Pokud je připojen IoT modul využívající mikrokontrolér na základní desce, provede se inicializace potřebných komponent a dojde k aktivaci časovače „CASOVAC“, který zajišťuje činnost zařízení, spuštěním „MAIN“, každých patnáct minut.



Obrázek 3.1 - Stavový diagram mikrokontroléru

Hlavní časovač „MAIN“ nejprve zablokuje pomocí proměnné své znovuspuštění alarmem nebo časovačem, aby celá činnost měření a odeslání dat proběhla nepřerušovaně. Blokace je ukončena až po vykonání celého cyklu. Po zablokování znovuspuštění je sepnut externí tranzistor, připojený k odporovému děliči, který je určený pro měření napětí baterie. Následně dojde k vyčtení hodnot z akcelerometru, teploměru a dobíječe. V poslední řadě je změřeno napětí baterie, aby došlo k ustálení napětí na snímacím odporovém děliči a naměření správné hodnoty napětí baterie, vlivem zpoždění při vyčítání hodnot ze senzorů. Napětí U je měřeno pomocí A/D převodníku, nastaveném na rozlišení deseti bitů. Hodnota A/D převodníku, je vnitřní funkcí vždy přepočítána, na rozsah 0 až 65 535, bez ohledu na jeho nastavené rozlišení. Výpočet napětí probíhá podle vzorce (3.1) a výpočet konstanty potřebné pro výpočet napětí podle vzorce (3.2). Protože napětí je odporovým děličem sníženo na polovinu, výsledné napětí je vynásobeno dvěma.

$$U = k \cdot \text{hodnota} \cdot 2 \quad (3.1)$$

$$k = \frac{U_{A/D}}{65\,535 - 1} = \frac{3,3}{65\,535 - 1} = 5.0355e - 05 \quad (3.2)$$

Kde *hodnota* představuje hodnotu A/D převodníku, $U_{A/D}$ je referenční napětí převodníku.

Po změření napětí baterie dojde ihned k rozeptnutí tranzistoru, čímž se eliminují ztráty elektrické energie, vlivem protékajícího proudu před odporový dělič napětí. Všechny naměřené veličiny se následně upraví, aby odpovídalo jejich řazení protokolu odesílaných dat a odešlou se ze zařízení pomocí IoT technologie. Těsně před ukončením „MAIN“ dojde k odblokování znovuspuštění.

V případě vyvolání alarmu, pomocí přerušení na alespoň jednom ze dvou alarmních pinů, dojde ke spuštění časovače „ALARM“, který spustí „MAIN“, jen pokud právě není blokováno jeho spuštění. Pokud již činnost probíhá, „ALARM“ je cyklicky spuštěn, dokud není činnost ukončena, aby ji mohl spustit znovu.

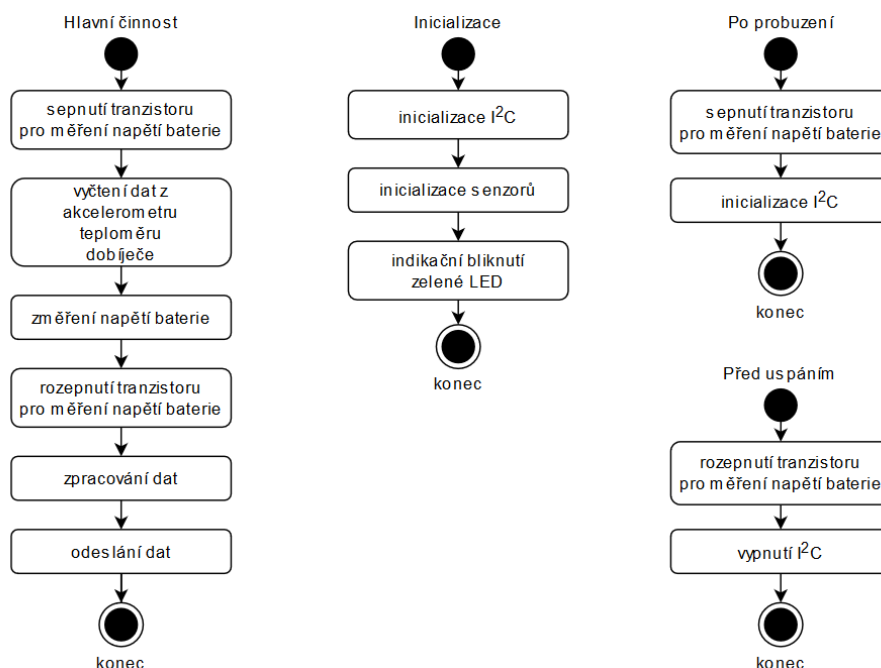
3.2 Software IQRF čipu

Program IQRF čipu se od mikrokontroléru odlišuje. Firmware je přehráván pomocí IQRF programátoru, pomocí dodávaného softwaru „IQRF IDE“. Nejprve je modul nastaven pomocí přehrávání konfigurace, ve které se nastavuje vysílací výkon, vysílací frekvence, zabezpečovací hesla a další nastavení. V konfiguraci je také určeno, jestli bude využit uživatelský DPA Handler. Dále je do modulu nahrán plugin, který zajistí, že se bude modul chovat, jako node. Posledním nahrávaným souborem je uživatelský DPA Handler, ve kterém se nachází uživatelský program.

Tok programu je řízen pomocí IQRF šablony, nazývané „DPA Handler“, který rozděluje celý program na jednotlivé události. Modul je programován v LP režimu, kdy stále naslouchá pokynům koordinátora. V případě přijetí požadavku koordinátora, pro vykonání činnosti, se spustí vyhrazená část kódu. Tato část je programově samostatně oddělená od části, která se má spustit, když nastane alarm. Zařízení má v případě činnosti vyvolané koordinátorem nebo alarmem vykonávat totožnou obsluhu. Z tohoto důvodu jsou části v programu totožné jak pro asynchronní, neboli alarmní, tak pro synchronní činnost. Příjem paketu, odeslaného zařízením, se v případě asynchronní zprávy odlišuje od zprávy synchronní. Z tohoto důvodu není nejvyšší, tedy sedmý bit bajtu dobíječe, nastavován na vysokou logickou úroveň v případě synchronní zprávy.

Stavový diagram můžeme vidět na obrázku (Obrázek 3.2), kde vlevo se nachází hlavní část činnosti. Při prvním zapnutí modulu se vykoná inicializační část, kde se inicializuje I²C sběrnice, nastaví se teploměr, akcelerometr a na závěr dojde k bliknutí zelené LED, která indikuje jeho spuštění. Využívány jsou také části

určené pro vykonání před a po režimu spánku. Po probuzení modulu, dochází k inicializaci I²C sběrnice, aby bylo možné komunikovat se senzory a sepnutí externího tranzistoru, pro měření napětí baterie na odporovém děliči. Před přechodem do režimu spánku se I²C sběrnice vypne a rozezne externí tranzistor, aby se co nejvíce snížila spotřeba elektrické energie.



Obrázek 3.2 - Stavový diagram IQRf čipu

Při spuštění činnosti je nejprve sepnut externí tranzistor pro měření napětí baterie. Poté se vyčtou data ze senzorů a změří se napětí baterie na odporovém děliči. Dále jsou data rozdělena do jednotlivých bajtů a odeslána. Tato činnost je velmi podobná činnosti „MAIN“ mikrokontroléru. Napětí baterie je měřeno A/D převodníkem s referencí 2,048 V. Naměřená hodnota je vynásobena dvěma, protože napětí baterie je sraženo na polovinu odporovým děličem. Maximální napětí U_{max} , které je možné naměřit je podle vzorce (3.3) 4,096V. Vyšší hodnota napětí baterie, je oříznuta a signalizována právě touto hodnotou. U měření napětí baterie však toto omezení nevadí, protože při této hodnotě, je již baterie nabitá a podstatou měření je monitorování jejího vybití.

$$U_{MAX} = U_{ref} \cdot 2 = 2,048 \cdot 2 = 4,096 \text{ V} \quad (3.2)$$

Kde U_{ref} představuje referenční napětí AD převodníku.

3.3 Konfigurace senzorů

Rozlišení teploměru je nastaveno na hodnotu 0,0625 °C. Kritická teplota je nastavena na 50 °C, nízká teplota na bod mrazu, tedy 0 °C a vysoká teplota na hodnotu 40 °C. Hystereze pro nízkou a vysokou teplotu je nastavena na 1,5 °C. Měření probíhá kontinuálně s periodou 250 ms, během které dochází k průměrování čtyř naměřených hodnot. Alarm je nastaven pouze na kritickou hodnotu a je signalizován nízkou úrovní na alarmovém pinu.

Akcelerometr je nastaven na citlivost ± 2 g s rozlišením 14 bitů. Senzor měří v kontinuálním režimu s rychlostí 100 Hz. Alarm je signalizován nízkou úrovní na alarmovém pinu. Priorita alarmu jednotlivých os, byla nastavena na pořadí X, Y, Z. Citlivost alarmu pro všechny osy je nastavena na totožnou hodnotu, aby ve všech osách reagoval stejně.

3.4 Komunikace s IoT moduly

Tato podkapitola se zabývá UART komunikací s IoT moduly Sigfox, LoRa, NB-IoT včetně jejich nastavením. V tabulkách jsou některé údaje nahrazeny třemi tečkami, aby zůstaly z bezpečnostních důvodů skryty.

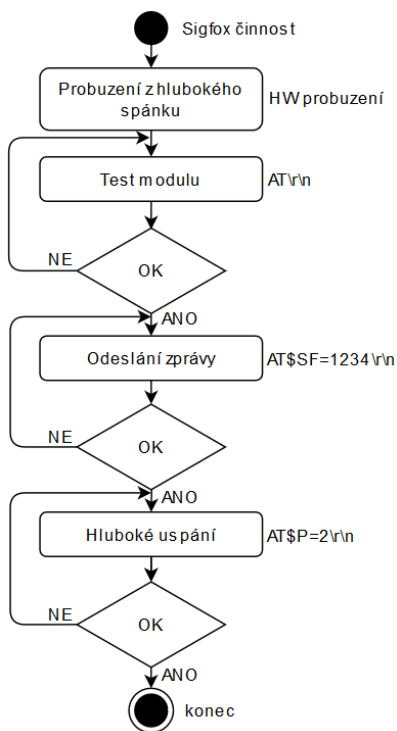
3.4.1 Sigfox IoT modul

Nejprve byly z čipu WISOL SFM10R1 vyčteny potřebné informace pro prvotní registraci do Sigfox sítě, mezi které patří ID a PAC. V tabulce (Tabulka 3.1) jsou uvedeny veškeré potřebné AT příkazy pro komunikaci s modulem a jeho nastavení. Ostatní parametry byly ponechány ve výchozím nastavení. Veškeré příkazy včetně odpovědí jsou zakončeny dvěma znaky „\r“ a „\n“.

Tabulka 3.1 - Základní AT příkazy pro komunikaci s Sigfox modulem, [18]

| AT příkaz | Odpověď modulu | Poznámka |
|-------------|----------------|-----------------------|
| AT | OK | Test modulu |
| AT\$I=10 | 00...F5 | Vyčtení ID |
| AT\$I=11 | 7F...44 | Vyčtení PAC |
| AT\$SF=1234 | OK | Odeslání dat „1234“ |
| AT\$P=2 | OK | Hluboké usnutí modulu |

Po zapnutí zařízení není potřeba provádět inicializace modulu. Cyklus pro odeslání dat začíná hardwarovým probuzení modulu z režimu hlubokého spánku. Poté se modul otestuje, zdali je připraven a odešlou se data. Pokud jsou data úspěšně odeslána, dojde k hlubokému usnutí modulu, čímž je cyklus odeslání dat dokončen. Na obrázku (Obrázek 3.3) můžeme vidět posloupnost činnosti pomocí stavového diagramu. Pokud modul zahlásí chybu na jakýkoli AT příkaz, příkaz se zopakuje.



Obrázek 3.3 - Stavový diagram činnosti IoT modulu Sigfox

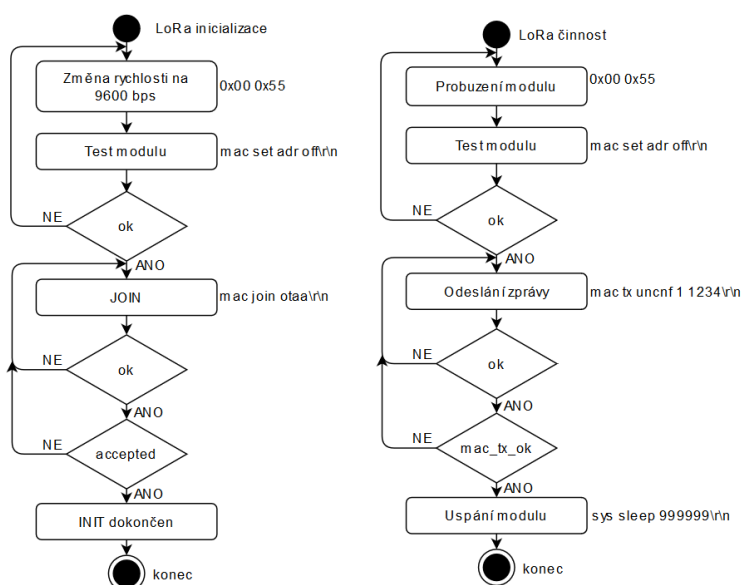
3.4.2 LoRa IoT modul

LoRa modul byl zaregistrován do sítě pomocí OTAA. Aby bylo možné modul zaregistrovat, musí z něj být vyčten údaj „deveui“. Dále se musí nastavit „appkey“ vygenerované IoT sítí. Údaj „appeui“ je modulu přiřazen IoT sítí. V tabulce (Tabulka 3.2) nalezneme přehled základních AT příkazů pro komunikaci s modulem.

Tabulka 3.2 - Základní AT příkazy pro komunikaci s LoRa modulem, [28]

| AT příkaz | Odpověď modulu | Poznámka |
|------------------------|----------------|----------------------------------|
| sys get hweui | 00...34 | Vyčtení hweui |
| mac get appeui | 70...84 | Vyčtení appeui |
| mac get deveui | 00...C2 | Vyčtení deveui |
| mac set appkey=6F...27 | ok | Nastavení appkey |
| 0x00 0x55 | | Změna UART rychlosti na 9600 bps |
| mac set adr off | ok | Adaptabilní rychlost přenosu |
| mac join otaa | ok accepted | Připojení do sítě |
| mac tx uncnf 1 1234 | ok mac tx ok | Odeslání dat „1234“ |
| sys sleep 999999\r\n | ok | Uspání na dobu 999999 ms |

Po zapnutí zařízení je nutné u modulu provést nejprve jeho inicializaci. Ta spočívá ve změně rychlosti na 9600 bps, protože rychlost UART mikrokontroléru podporuje pouze tuto rychlost v LP režimu. Po změně rychlosti se provede test modulu, jestli se rychlost nastavila správně a modul je připraven k další činnosti. Modul je možné otestovat více způsoby, vybrán byl příkaz pro vypnutí adaptabilní rychlosti přenosu. Jeho výchozí nastavení se shoduje. Nastavení modulu se tedy nijak nezmění, ale odpoví „ok“, které je bráno jako připravenost modulu. Protože byla zvolena metoda OTAA, musí se zařízení připojit k síti pomocí příkazu „join“. Modul nejprve potvrdí přijetí příkazu a poté jej vykoná. Pokud připojení proběhne úspěšně, modul dále odpoví „accepted“. V tuto chvíli je již inicializace modulu dokončena. Na obrázku (Obrázek 3.4) je graficky zobrazena posloupnost inicializace a činnosti pomocí stavového diagramu.



Obrázek 3.4 - Stavový diagram inicializace a činnosti IoT modulu LoRa

Cyklus odeslání dat začíná probuzením LoRa modulu z režimu spánku pomocí příkazu shodného s příkazem pro změnu UART komunikační rychlosti. Opět se modul otestuje, zdali je již připraven. Následující odeslání dat proběhne zadáním jednoho AT příkazu, který data odešle. Úspěšné odeslání je signalizováno odpovědí „mac_tx_ok“. Činnost odeslání dat je ukončena uspáním modulu na dobu 999 999 ms, kde je tento čas nastaven tak, aby byl delší, než je interval měření zařízení. V tomto případě nikdy nedojde k jeho probuzení vlivem uplynutí nastavené doby, ale je probouzen vždy manuálně.

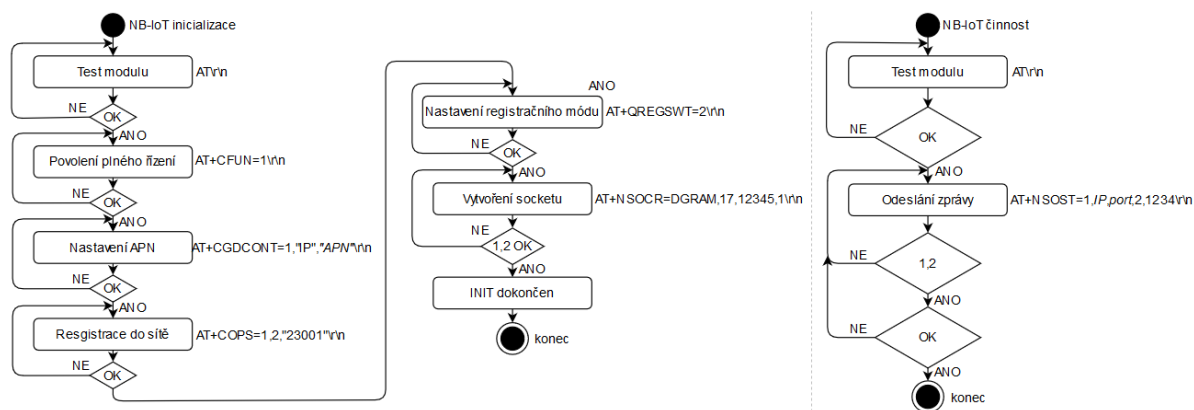
3.4.3 NB-IoT IoT modul

Nastavení NB-IoT modulu závisí na vložení mikro SIM kartě, která se váže k operátorovi poskytující služby. Modul byl vyzkoušen s kartou SIM, operátora T-Mobile a Vodafone. U NB-IoT modulu není nutné registrovat samotný čip, protože jako identifikátor slouží vložená SIM karta. V tabulce (Tabulka 3.3) jsou uvedeny základní AT příkazy, které jsou pro komunikaci s modulem využity.

Tabulka 3.3 - Základní AT příkazy pro komunikaci s NB-IoT modulem, [27]

| AT příkaz | Odpověď | Poznámka |
|---------------------------------------|---------|------------------------------|
| AT | OK | Test modulu |
| AT+CFUN=1 | OK | Nastavení plné funkcionality |
| AT+CGDCONT=1,"IP","APN" | OK | Nastavení APN |
| AT+COPS=1,2,"23001" | OK | Registrace do sítě T-mobile |
| AT+COPS=1,2,"23003" | OK | Registrace do sítě Vodafone |
| AT+QREGSWT=2 | OK | Nastavení registračního módu |
| AT+NSOCR=DGRAM,17,12345,1 | 1 OK | Vytvoření socketu |
| AT+NSOST=1,XXX.XXX.XXX.XXX,XXX,2,1234 | 1,2 OK | Odeslání dat „1234“ |

Před odesláním dat je nutné IoT modul nejprve nastavit. Prvně je nastaveno povolení plné funkcionality. Následuje nastavení APN, které závisí na poskytovateli služby. V případě operátora T-mobile bylo APN nastaveno na „iot.t-mobile.com“. Pro otestování služeb operátoru Vodafone, bylo nastaveno APN na „hardwario.com“. APN se volí podle SIM karty v závislosti její registrace. Dále se provede registrace do sítě. Opět je připojení rozdílné podle typu operátora. Také se nastaví registrační mód a vytvoří se socket. Po tomto nastavení je možné data odesílat již pouze jedním AT příkazem. Na obrázku (Obrázek 3.5) můžeme vidět stavový diagram IoT modulu. Čip Quectel BC68 není nutný probouzet ani uspávat. Je konstruován tak, aby v nečinnosti spotřebovával co nejméně energie.



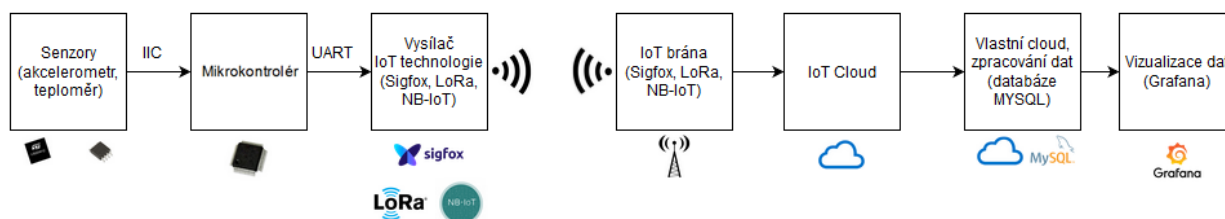
Obrázek 3.5 - Stavový diagram inicializace a činnosti IoT modulu NB-IoT

4 Zpracování a vizualizace dat

Tato kapitola se zabývá přenosem dat na server, uložením dat do databáze, dekodováním dat a následnou vizualizací v grafické podobě.

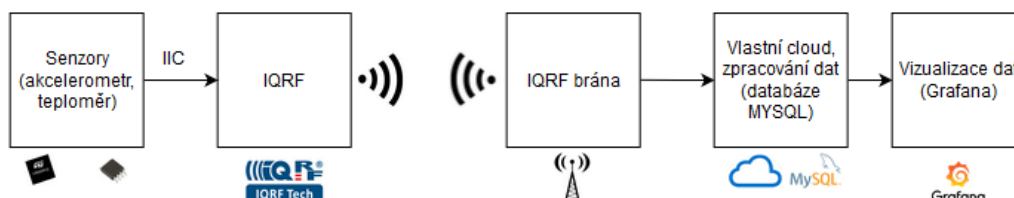
4.1 Měřicí řetězec sběru dat

Měřicí řetězec blokově zobrazuje celou cestu přenosu dat, od samotného vyčtení dat ze senzorů, přes odeslání dat pomocí IoT technologie, archivaci dat v MySQL databázi, až po konečnou vizualizaci v Grafaně. Na obrázku (Obrázek 4.1) níže, je vyobrazen měřicí řetězec pro první tři IoT technologie, Sigfox, LoRa a NB-IoT.



Obrázek 4.1 - Měřicí řetězec IoT technologií, Sigfox, LoRa, NB-IoT

Obrázek (Obrázek 4.2) zobrazuje měřicí řetězec pro IoT technologii IQRF. Oproti předchozího měřicího řetězce se odlišuje absencí mikrokontroléru a IoT cloudu. IQRF modul má již mikrokontrolér zabudovaný přímo v čipu a využívá vlastní lokální vybudovanou IQRF síť. Z této sítě se data odesílají přímo na vlastní zvolený server, bez nutnosti využití IoT serveru třetích stran.



Obrázek 4.2 - Měřicí řetězec IoT technologie IQRF

4.2 Protokol odesílaných dat IoT moduly

Aby bylo zařízení zcela univerzální pro veškeré technologie, bylo určeno základní uspořádání dat s omezenou délkou na maximálně 12 bajtů. Omezení vyplývá z maximálního počtu odeslání dat přes technologii Sigfox. Omezení se ostatních technologií netýká, ale kdyby nebylo toto omezení respektováno, nebylo by zařízení možné libovolně využívat se všemi technologiemi stejným způsobem.

| byte | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|---|---------|---|----------------|---|---|---|---------------|---------|
| data | akcelerometr osa X | akcelerometr osa Y | akcelerometr osa Z | | teplota | | napětí baterie | | | | stav dobíječe | rezerva |

bit: 7

| |
|----------------------------------|
| 0 - synchronní |
| 1 - asynchronní (alarmní zpráva) |

bit: 0 a 1

| |
|---------------------------|
| 00 - baterie se nedobíjí |
| 01 - baterie se dobíjí |
| 02 - baterie je vadná |
| 03 - chyba NTC termistoru |

Obrázek 4.3 - Pořadí dat odesílaných zařízením

Prvních šest bajtů je určeno pro tříosý akcelerometr. Pro každou osu je vyhrazeno místo o velikosti dvou bajtů. Rozlišení akcelerometru je 14 bitů a dva bity každé osy tedy zůstávají nevyužity. Celkem zůstává šest bitů nevyužito. Dále následuje vyhrazení dvou bajtů pro teplotní senzor. Teplota je ze senzoru vyčítána pomocí dvou bajtů včetně alarmních bitů. Další dva bajty jsou vyhrazeny pro napětí baterie. Předposlední bajt nese informaci o dobíječi a typu zprávy. Sedmý bit tohoto bajtu udává, jestli se jedná o synchronní zprávu nebo o asynchronní, tedy alarmní zprávu. Grafické uspořádání dat můžeme vidět na obrázku (Obrázek 4.3).

Dobíječ se může nacházet ve čtyřech stavech, kdy dobíjí, nedobíjí, hlásí vadnou baterii nebo vadný NTC termistor. Poslední dvanáctý bajt s označením jedenáct, zůstává neobsazen jako rezerva, pro případnou změnu softwaru a zaslání další informace. Hodnoty využívající dvou bajtů jsou řazeny za sebou v pořadí, prvně nižší bajt poté vyšší bajt.

V případě potřeby uvolnění dalšího bajtu je možné omezit vyhrazené místo pro napětí baterie ze dvou bajtů na jeden. V takovémto případě bude rozlišení napětí indikováno pouze ve 255 úrovních, které ale může být dostatečné pro měření na desetiny, pokud se bude počítat s určitým offsetem od nuly. Offset může být nastaven například na minimální hodnotu napětí, kdy je elektronika ještě schopna pracovat. Při poklesu pod tuto hranici napětí nebude elektronika schopna pracovat a data nebudou odesílána. Pokud by bylo nutné počet odesílaných bajtů ještě omezit, mohl by být bajt nesoucí informaci o dobíječi a typu zprávy přerozdělen do volných bitů akcelerometru. Pomocí těchto dvou úprav je možné zprávu zkrátit celkem o dva bajty. Tyto kompresní úpravy nebyly provedeny. Jedná se pouze o následné možnosti optimalizace, spojené se snížením spotřeby elektrické energie, při odesílání dat.

V rámci spoření elektrické energie zařízení data pouze odesílá a na případné příchozí zprávy nereaguje. V případě senzorů většinou ani není potřeba data do zařízení odesílat, důležitý je pouze sběr dat ze zařízení. Z tohoto důvodu není nutné stanovit protokol příchozích dat.

4.3 Přenos dat

Data ze zařízení přichází v surové podobě, bez předchozího zpracování, aby nebyl zbytečně zatěžován mikrokontrolér a zvyšována jeho spotřeba elektrické energie. Data zůstávají nezpracována také z důvodu snazšího přenosu dat IoT technologiemi. Z tohoto důvodu jsou surová data zpracovávána až na serveru. K uchování dat slouží MySQL databáze, ve které jsou založeny vždy tři tabulky pro každou IoT technologii. Do jedné tabulky se ukládají veškerá příchozí surová data dané technologie. V druhé tabulce se nachází povolení a do třetí tabulky jsou ukládána již zpracovaná data. Do příloh jsou umístěny potřebné soubory pro přeposlání dat na školní server ze všech čtyř technologií.

4.3.1 Sigfox

Data odesílaná technologií Sigfox, jsou odesílána na IoT server „backend.sigfox.com“. Na tomto serveru se veškeré příchozí zprávy archivují. Všechny zprávy je tedy možné si kdykoli zobrazit. Na obrázku (Obrázek 4.4) se nachází ukázka dat, archivovaných na Sigfox backend serveru. Ukládány jsou surová data včetně síly signálu a času přijetí zprávy. U každé zprávy je také možné zobrazit status endpointu, zdali byla data přeposlána v pořádku, nebo došlo k chybě.

| Time | Seq Num | Data / Decoding | LQI | Callbacks | Location |
|---------------------|---------|------------------------|-----|-----------|----------|
| 2020-04-15 12:37:34 | 3015 | 100038016cc08501e70e03 | | | |
| 2020-04-15 12:22:11 | 3014 | 1800400180c08901e70e03 | | | |
| 2020-04-15 12:06:48 | 3013 | ecff480160c08b01e70e03 | | | |

Obrázek 4.4 - Ukázka archivovaných dat na Sigfox backend serveru

Registrace nového zařízení se provádí na stránce „buy.sigfox.com“. Zařízení je sice možné přidat i přímo v přehledu zaregistrovaných zařízení, ale modul se touto cestou nikdy přidat nepovedlo. Po odeslání dotazu na podporu, bylo zjištěno, že přidání je možné pouze přes stránku „buy.sigfox.com“. I když byl postup správný, některé další zařízení nebylo možné přidat pod stejný účet, ani přes stránku „buy.sigfox.com“. Jednalo se o chybu, která byla předána Sigfox podpoře. Jediným řešením jak přidat další zařízení, bylo odeslání požadavku na podporu, která následně provedla jeho registraci. Při odregistrování modulu se změní jeho PAC. Ten se vždy vygeneruje nový a je nutné ho vyčíst ze Sigfox backend. PAC uložený v zařízení se nepřepíše a nebude tedy po odregistraci platný.

Přeposílání dat na vlastní server je možné například pomocí metody e-mailu nebo HTTP protokolu s využitím metody GET, POST a PUT. Pro přeposílání dat byla zvolena HTTP metoda POST. Sigfox backend umožňuje současně data přeposílat na více serverů. Jednotlivé nastavené endpointy je možné jednoduše povolovat nebo zakazovat. Při nastaveném endpointu se odešlou vždy jen příchozí data. Data, která přišla před nastaveným endpointem, se již nepřepošlou. I v případě přeposílání dat se dále data archivují na Sigfox backend serveru. Metodou POST se při přeposlání vyvolá PHP skript na školním serveru, na který je přeposílání nastaveno. PHP skript data načte, zpracuje a uloží do databáze jako surová data. Společně se surovými daty jsou ukládány informace o síle signálu, čase přijetí zprávy a ID zařízení.

4.3.2 LoRa

Data využívající k přenosu technologii LoRa byla přenášena dvěma způsoby. První způsob bylo využití vlastní LoRa brány a využití služeb TTN. Druhým způsobem bylo odesílání dat, přes vybudovanou LoRa síť společnosti České Radiokomunikace.

Příchozí data se na TTN serveru nearchivují. Možné je pouze zobrazit příchozí data v době otevřeného náhledu dat. Po aktualizaci stránky se list vymaže a opět budou k dispozici pouze nově příchozí data. Na obrázku (Obrázek 4.5) jsou vyobrazen tři příchozí zprávy na TTN serveru.

| | time | counter | port | |
|---|----------|---------|------|--|
| ▲ | 13:02:55 | 5 | 1 | payload: 88 FE 84 01 7C C07D 01 29 10 03 |
| ▲ | 13:01:53 | 4 | 1 | payload: 8C FE AC 01 64 C07D 01 29 10 03 |
| ▲ | 13:00:52 | 3 | 1 | payload: A4 FE D8 01 6C C07D 01 29 10 03 |

Obrázek 4.5 - Ukázka tří zpráv LoRa - TTN

Zařízení je nutné nejprve zaregistrovat na TTN server, na stránkách „thethingsnetwork.org“. Prvně musí být vytvořena aplikace, do které se poté přidávají jednotlivá zařízení. Zařízení je možné zaregistrovat metodou ABP nebo OTAA. Pro registraci byla zvolena aktivační metoda OTAA, kde bylo nutné zadat pouze název zařízení a DevEUI. AppEUI a AppKey vygeneruje TTN server, tyto údaje je nutné zapsat do LoRa modulu v zařízení.

TTN server umožňuje přeposílání dat různými způsoby. Nastavené přeposílání dat vždy platí pro veškerá zařízení, ve stejné aplikaci. Přeposílání dat na školní server je provedeno pomocí MQTT. Na školním serveru je spuštěn skript napsaný v jazyce python, který je připojen k MQTT brokeru a očekává zpětné volání „onMessage“, na základě kterého získá zprávu. Zpráva je ve formátu JSON a před uložením do databáze se surovými data je zpracována.

Vlastní LoRa bránu je před jejím využíváním nutné zaregistrovat na TTN serveru. Při registraci je nutné zadat eui brány, které odpovídá upravené mac adrese minipočítače Raspberry PI. Mac adresa se upravuje vložení „fffe“ do středu mac adresy, aby eui brány obsahovalo šestnáct znaků. Volba eui brány nemusí být provedena tímto postupem, ale aby nedošlo ke stejnému pojmenování brán, využívá se právě mac adresy Raspberry Pi, kterou má každé Raspberry PI odlišné. Vkládání „fffe“ do středu adresy je standardem VŠB LoRa brán, aby se od ostatních odlišovaly. Na obrázku (Obrázek 4.6) se nachází názorná ukázka vytvoření eui brány z mac adresy Raspberry PI.

123456789abc -> 123456fffe789abc
mac eui brány

Obrázek 4.6 - Ukázka vytvoření eui LoRa brány

Na TTN serveru je možné otevření náhledu a zobrazení dat putujících právě přes tuto bránu. Data jsou šifrovaná. Mezi viditelné informace patří například devAddr nebo síla signálu. Na obrázku (Obrázek 4.7) je ukázka tří zpráv. Tyto zprávy odpovídají zprávám v předchozím obrázku, ukazujícím zprávy zařízení.

| time | frequency | mod. | CR | data rate | airtime (ms) | cnt |
|------------|-----------|------|-----|-------------|--------------|--|
| ▲ 13:03:56 | 868.1 | lor | 4/5 | SF 7 BW 125 | 61.7 | 6 dev addr: 26 01 29 E0 payload size: 24 bytes |
| ▲ 13:02:55 | 867.9 | lor | 4/5 | SF 7 BW 125 | 61.7 | 5 dev addr: 26 01 29 E0 payload size: 24 bytes |
| ▲ 13:01:53 | 867.3 | lor | 4/5 | SF 7 BW 125 | 61.7 | 4 dev addr: 26 01 29 E0 payload size: 24 bytes |

Obrázek 4.7 - Ukázka tří zpráv LoRa brány- TTN

Pro využití služeb ČRA je taktéž nutné zařízení nejprve zaregistrovat na jejich stránkách „iot.cra.cz“. Pokud je potřeba přidat více zařízení najednou, je možné využít hromadného importu z csv souboru, který musí přesně odpovídat vzorovému souboru. Zařízení je možné přidat pomocí metody ABP nebo OTAA. Protože registrované zařízení je připraveno na registraci OTAA, bylo zaregistrováno pouze touto metodou. Při registraci je nutné zadat název zařízení, DevEUI, AppEUI a AppKey. Po provedení registrace se budou již odesílané zprávy ukládat na serveru ČRA. Pro zobrazení dat je nutné provést jejich export. Ukázka jedné vyexportované zprávy je na obrázku (Obrázek 4.8).

```
{ "cmd": "gw", "seqno": 199269878, "EUI": "00XXXXXXXXXXXXC1", "ts": 1585426834967, "fcnt": 4, "port": 1,
  "freq": 867900000, "toa": 66, "dr": "SF7 BW125 4/5", "ack": true, "gws": [{"rssi": -117, "snr": 1,
    "ts": 1585426834967, "tmms": 2955, "time": "2020-03-28T20:20:34.955397507Z", "gweui": "024B0BFFFF03073F",
    "lat": 49.62757, "lon": 18.627523}], "bat": 255, "data": "b0ff14f85cbf0008770903" }
```

Obrázek 4.8 - Ukázka jedné zprávy LoRa - České Radiokomunikace

Přeposílání dat na vlastní server umožňují i České radiokomunikace. Přeposílání je možné pomocí protokolu REST, pouze pomocí HTTPS. Endpoint na školní server nebyl nastaven, protože školní server v aktuální konfiguraci neumožňuje https, umožňuje pouze http. Aby tedy bylo možné data přeposílat na školní server, musel by být server přenastaven.

4.3.3 NB-IoT

Odesílání dat technologií NB-IoT bylo vyzkoušeno s využitím SIM karty operátora T-mobile a Vodafone. Odesílání dat je možné pomocí TCP nebo UDP protokolu. Odesílání dat u obou operátorů bylo zrealizováno pomocí UDP.

Protože NB-IoT síť operátora T-Mobile nepokrývá téměř celou Českou republiku, jako operátor Vodafone, testování probíhalo ve školní laboratoři, kde se nachází základnová přenosová stanice, operátora T-Mobile. Odesílání dat na školní server nebylo zrealizováno, protože nebyl patřičný port povolen. Na školním serveru je již připraven UDP listener pro příjem zpráv. Jeho funkčnost byla otestována odesláním zprávy z jiného zařízení, které data odesílalo přes povolený port. Odeslání dat bylo vyzkoušeno odesláním zprávy na jiný testovací školní server, s povoleným patřičným portem. Na tento server data úspěšně dorazila a pro kontrolu byla vypisována do konzole. Na obrázku (Obrázek 4.9) je ukázka výpisu příchozí zprávy do konzole.

```
20:15:10.244273 IP (tos 0x0, ttl 241, id 1, offset 0, flags [none], proto UDP (17), length 39)
tmo-118-142.customers.dl-online.com.15577 > liptel-ea005-177.vsb.cz.50000: [udp sum ok] UDP, length 11
0x0000: 000c 298a 1af3 0023 3455 a400 0800 4500 ..)....#4U...E.
0x0010: 0027 0001 0000 f111 6f05 50bb 768e 9ec4 ..'.....O.P.v...
0x0020: f4b1 3cd9 c350 0013 3f0c 1000 5001 4cc0 ..<...P..?...P.L.
0x0030: 9501 210f 03aa aaaa 0000 0000 ..!.....
```

Obrázek 4.9 – Ukázka výpisu příchozí zprávy do konzole - T-Mobile

V případě operátora Vodafone, byla zapůjčena SIM karta od společnosti HARDWARIO s.r.o., která má odesílání dat povoleno pouze na jejich vlastní server. Z tohoto důvodu je využíván jejich HARDWARIO server, kam se data odesílají a zároveň jsou zde i archivována. Přeposílání dat na vlastní server je možné pomocí metody **GET**, **POST**, **PUT** a **PATCH**. Pro přeposílání na školní server byla zvolena metoda POST, stejně jako v případě IoT technologie Sigfox. Data odesílaná na HARDWARIO server musí obsahovat v prvních osmi bajtech zakódovanou informaci **IMSI**, aby byla zpráva správně vyhodnocena a přiřazena ke správnému účtu. Z tohoto důvodu je počet odesílaných dat navýšen z původních jedenácti na devatenáct bajtů. Měření spotřeby této technologie probíhalo jen s původními jedenácti bajty. Na obrázku (Obrázek 4.10) se nachází ukázka archivované zprávy na serveru HARDWARIO.

```
Data
{
  "imsi": xxxxxxxxxxxxxxxx
}

Raw
xxxxxxxxxxxxxxxx30fce40424c5a801ea0c03

Callback
rc111 2020-05-12T00:28:02.248Z Status 200
```

Obrázek 4.10 - Ukázka jedné zprávy - server HARDWARIO

4.3.4 IQRF

Přenos dat pomocí IQRF technologie se od předchozích technologií odlišují. Data nejsou odesílána na IoT server, ale na školní server jsou přeposílána přímo z IQRF brány pomocí MQTT. Příchozí zprávy se nearchivují, pokud není nastaveno přeposílání dat na server, kde dojde k jejich uložení. Na obrázku (Obrázek 4.11) je znázorněna ukázka jedné zprávy, která byla manuálně vyčtena ze zařízení, tedy mimo nastavený časovač.









```

{
  "mType": "iqrRaw",
  "data": {
    "msgId": "a604925f-59ad-437c-b60a-77a70c174490",
    "rsp": {
      "rData": "01.00.20.80.5f.05.00.4d.e8.fc.9c.02.dc.bf.7a.01.18.0f.03"
    },
    "raw": [
      {
        "request": "01.00.20.00.ff.ff",
        "requestTs": "2020-05-13T17:00:50.989+02:00",
        "confirmation": "01.00.20.00.ff.ff.47.01.08.01",
        "confirmationTs": "2020-05-13T17:00:51.016+02:00",
        "response": "01.00.20.80.5f.05.00.4d.e8.fc.9c.02.dc.bf.7a.01.18.0f.03",
        "responseTs": "2020-05-13T17:00:51.268+02:00"
      }
    ],
    "insId": "iqrfgd2-default",
    "statusStr": "ok",
    "status": 0
  }
}

```

Obrázek 4.11 - Ukázka zpráv IQRF

Ovládání IQRF brány včetně jejího nastavení se provádí přes internetové rozhraní. K IQRF rozhraní brány je možné se připojit pomocí zadání její IP adresy, do internetového prohlížeče, v lokální síti. Přes její rozhraní je možná spravovat IQRF síť. Na obrázku (Obrázek 4.12) je výřez grafického zobrazení přehledu IQRF sítě. Pozice označená zeleným domečkem představuje koordinátora, tedy IQRF bránu. Node na pozici jedna je vyznačen zelenou značkou, která představuje online stav. Kdyby byla značka modrá, nebyl by online.

| | 0 | 1 | 2 | 3 |
|----|---|---|---|---|
| 00 |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |

Obrázek 4.12 - Ukázka IQRF sítě - rozhraní IQRF brány

IQRF brána umožňuje nastavení časovače, pro automatické vyčítání dat. Počet nastavených časovačů není omezen. Na obrázku (Obrázek 4.13) je vyobrazen časovač, nastavený pro vyčítání dat ze zařízení, cyklicky každých patnáct minut. Časovač vždy odešle DPA paket pro vyčtení dat. DPA paket je nastaven pro vyčítání ze zařízení, nastaveného jako uživatelská periferie s adresou jedna.

| ID | Time | Service | Message type | DPA request |
|---------------|---------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| 1 585 564 958 | every 15:00 minutes | SchedulerMessaging | iqrRaw | 01.00.20.00.FF.FF |

Obrázek 4.13 - Časovač pro vyčítání dat

4.4 Zpracování dat

Zpracování dat je provedeno spouštěcím skriptem, napsaným v jazyce python, pro každou IoT technologii zvlášť. Každá IoT technologie totiž obsahuje krom samotných dat ze zařízení, také různé informace, například o síle signálu nebo identifikátoru zařízení. Zpracovaná data se ukládají do další tabulky v databázi. Po zpracování dat jsou data v databázi duplicitně uložena. Jednou v surové podobě a podruhé v podobě již zpracované. Duplicita je provedena z důvodu, aby po zpracování bylo možné kdykoli nahlédnout na surová data, například při chybném zpracování. Dále by bylo možné vytvořit skript, který by v případě potřeby snížení množství zabrané paměti serveru, postupně umazával surová data, starší než zvolená maximální doba uchování dat.

V tabulce, určené pro již zpracované data, se nachází vždy sloupec „IdRaw“, ve kterém je uložena hodnota odpovídající „Id“ tabulky s nezpracovanými daty. Pomocí této kolonky je možné se zpětně odkazovat, na daný řádek se surovými daty. Před načtením surových dat ke zpracování, je nejprve načtena poslední hodnota „IdRaw“, která označuje, poslední zpracovaný řádek a nové zpracování dat je spuštěno, až od následujícího řádku.

Počet zpracovaných dat při jednom spuštění skriptu je omezen, aby nedošlo při velkém množství dat k zaměstnání serveru na příliš dlouhou dobu. Omezení bylo nastaveno na hodnotu pět set řádků. Do příkazu výběru surových dat pro zpracování, je zařazena kontrola povolení. V třetí oddělené tabulce, se totiž nachází povolení jednotlivých zařízení, aplikací nebo brán. Vybrány jsou pouze řádky, které obsahují povolené hodnoty. Ostatní řádky nejsou do výběru zahrnuty.

Dále jsou data zpracována a uložena do tabulky s již zpracovanými daty. Zápis se provádí pomocí dvou příkazů. Prvním příkazem se zapíší veškeré hodnoty, včetně vypočteného úhlu, pokud byla splněna podmínka pro výpočet úhlu naklonění. V opačném případě se vykoná druhý příkaz, který nahradí hodnoty úhlu náklonu hodnotou NULL.

4.4.1 Akcelerometr

Pro každou osu je nejprve proveden přepočít na jednotlivá tíhová zrychlení. Dvoubajtová proměnná je upravena pomocí dvojkového doplňku a poté jsou její bity posunuty o dva doprava. Dále je nutné proměnnou vynásobit konstantou g_k podle vzorce (4.1). Konstanta g_k vyplývá z bitového rozlišení akcelerometru a jeho nastavené citlivosti. Citlivost akcelerometru byla nastavena na $\pm 2g$. Citlivost pro výpočet konstanty je tedy čtyři g. Touto úpravou získáme již výsledné tíhové zrychlení každé osy. Protože pro měření stability budovy je důležitý úhel náklonu budovy, musí být vypočteny úhly náklonu v ose X a Y. Výpočet úhlu se proveden jen pokud vektorový součet v , podle vzorce (4.2), je roven přibližně jedné. Rozsah tolerance je stanoven na $\pm 0,05$, aby se zabránilo nepřesnostem akcelerometru a případným velmi mírným vibracím, které výsledný úhel příliš nezkreslí. Protože je akcelerometr osazen na základní desce zespodu a je tedy otočen, tíhové zrychlení osy Z a osy X, jsou vždy vynásobeny mínus jedničkou, aby byly v požadovaném směru.

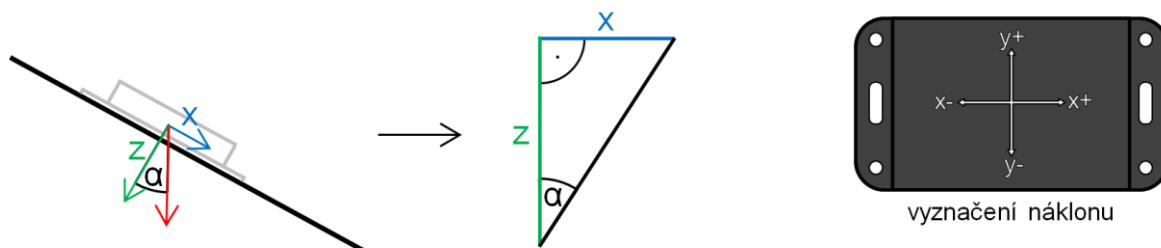
$$g_k = \frac{\text{citlivost}}{2^{\text{rozlišení}}} = \frac{4}{2^{12}} = 2,4414062e - 04 \quad (4.1)$$

Kde *citlivost* je rozsah měření (-2 až $+2 = 4$) a *rozlišení* je počet bitů akcelerometru.

$$v = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4.2)$$

Kde x je tíhové zrychlení osy X, y je tíhové zrychlení osy Y a z je tíhové zrychlení osy Z.

Na obrázku (Obrázek 4.14) můžeme vidět grafické znázornění určení úhlu náklonu zařízení a odvození pravoúhlého trojúhelníku pro výpočet. Zobrazeno je odvození pro výpočet úhlu osy X. Pro výpočet úhlu osy Y, se dosadí tíhové zrychlení Y, místo tíhového zrychlení X.



Obrázek 4.14 - Grafické znázornění pro výpočet úhlu osy X

Jak již z obrázku (Obrázek 4.14) vyplývá, výpočet výsledného úhlu náklonu je prováděn pomocí geometrické funkce tangens, podle vzorce (4.3) pro osu X a podle vzorce (4.4) pro osu Y.

$$\tan \alpha = \frac{x}{z} \rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \quad (4.3)$$

$$\tan \alpha = \frac{y}{z} \rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{z} \right) \quad (4.4)$$

Kde x je tíhové zrychlení osy X a z je tíhové zrychlení osy Z.

4.4.2 Teploměr

Nejvyšší bit dvoubajtové proměnné, představuje překročení kritické teploty, pokud je v logické jedničce. Druhý nejvyšší bit představuje překročení vysoké teploty a třetí nejvyšší bit, pokles teploty pod nízkou úroveň. Tyto tři bity však nejsou k přepočtu surových dat na výslednou teplotu využity. Čtvrtý nejvyšší bit udává znaménko. Bity nula až dvanáct představují zakódovanou teplotu. V tabulce (Tabulka 4.1) je přehledně vyobrazeno zakódování teploty ve dvou bajtech.

Tabulka 4.1 - Kódovaná teplota ve dvou bajtech, [20]

| bit | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|-----|-------------------|-----------------|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| | T_{CRIT} | T_{UP} | T_{LOW} | – | 2^7 | 2^6 | 2^5 | 2^4 | 2^3 | 2^2 | 2^1 | 2^0 | 2^{-1} | 2^{-2} | 2^{-3} | 2^{-4} |

Výpočet teploty t , se provádí dle vzorce (4.5), na kterém je vyznačený postup přepočtu. Pokud je znaménko záporné, označené logickou jedničkou, výsledná teplota se musí přepočítat dále podle vzorce (4.6).

$$t = 0\text{bit}^{-4} + 1\text{bit}^{-3} + \dots + 10\text{bit}^6 + 11\text{bit}^7 \quad (4.5)$$

Kde $n\text{-bit}$ označuje daný bit.

$$t_2 = (256 - t) \cdot (-1) \quad (4.6)$$

Kde t_2 představuje přepočtenou teplotu a t představuje teplotu před přepočtem.

4.4.3 Napětí

Hodnota o stavu baterie je přijímána ve dvou bajtech odpovídající hodnotě napětí v milivoltech. Aby bylo výsledné vizualizované napětí U ve voltech, bylo přepočteno pomocí vzorce (4.7).

$$U = \frac{\text{hodnota}}{1000} \quad (4.7)$$

Kde *hodnota* odpovídá dvoubajtové hodnotě napětí baterie.

4.5 Ukázka naměřených dat

Zobrazovaná data na obrázcích jsou reprezentována pomocí výstřižků, z nástroje „phpMyAdmin“. Některé údaje byly nahrazeny znaky „X“, aby zůstaly skryty. Z každé IoT technologie byly zachyceny dva řádky, kdy vždy první řádek odpovídal synchronnímu měření, kde zařízení setrvalo v klidu. Druhý řádek představuje asynchronní zprávu. Pro odeslání asynchronní zprávy, bylo se zařízením rychle pohnuto, tak aby se vyvolal alarm akcelerometru a zároveň aby zařízení bylo v pohybu a vektorový součet se nerovnal přibližně jedné. Obrázek se zpracovanými daty vždy odpovídá surovým datům, na předchozím obrázku.

4.5.1 Ukázka dat Sigfox

Na obrázku (Obrázek 4.15) jsou vyobrazena surová data technologie Sigfox.

| Id | TsServer | Ts | Device | RawData | Rssi |
|-----|---------------------|---------------------|--------|----------------------------------|------|
| 361 | 2020-05-13 23:43:57 | 2020-05-13 23:43:57 | XXXXXX | fc.00.c4.02.cc.c0.a1.01.6d.0e.03 | -114 |
| 362 | 2020-05-13 23:46:41 | 2020-05-13 23:46:41 | XXXXXX | 38.fd.d4.04.2c.c5.92.01.66.0e.83 | -118 |

Obrázek 4.15 - Ukázka surových dat technologie Sigfox

Na obrázku (Obrázek 4.16) jsou vyobrazena již zpracovaná data technologie Sigfox.

| Id | IdRaw | Ts | Device | OsaX | OsaY | OsaZ | uhelOsaX | uhelOsaY | Teplota | Napeti | Dobijec | Rssi | Status |
|-----|-------|---------------------|--------|------------|-----------|----------|-----------|----------|---------|--------|---------|------|--------|
| 347 | 361 | 2020-05-13 23:43:57 | XXXXXX | -0.0153809 | 0.0432129 | 0.987549 | -0.892297 | 2.50553 | 26.0625 | 3.693 | 3 | -114 | ok |
| 348 | 362 | 2020-05-13 23:46:41 | XXXXXX | 0.043457 | 0.0754395 | 0.919189 | NULL | NULL | 25.125 | 3.686 | 3 | -118 | async |

Obrázek 4.16 - Ukázka zpracovaných dat technologie Sigfox

Na obrázku (Obrázek 4.17) se nachází tabulka, ve které se nastavuje povolení, jestli se mají data se stejnou hodnotou „Device“ zpracovávat, nebo se mají přeskakovat. Zpracování se povoluje jedničkou.

| Id | Device | povoleni | Poznamka |
|----|--------|----------|----------|
| 1 | XXXXXX | 1 | node |

Obrázek 4.17 - Povolovací tabulka technologie Sigfox

4.5.2 Ukázka dat LoRa

Na obrázku (Obrázek 4.18) jsou vyobrazena surová data technologie LoRa.

| Id | TsServer | Ts | Appld | DevEUI | RawData | Rssi |
|-----|---------------------|---------------------|----------|--------------------|----------------------------------|------|
| 288 | 2020-05-14 00:15:59 | 2020-05-14 00:15:58 | aplikace | XXXXXXXXXXXXXXXXXX | 5c.ff.54.00.60.c0.85.01.60.0e.03 | -45 |
| 289 | 2020-05-14 00:17:00 | 2020-05-14 00:17:00 | aplikace | XXXXXXXXXXXXXXXXXX | fc.a0.24.57.18.50.ab.01.29.10.83 | -48 |

Obrázek 4.18 - Ukázka surových dat technologie LoRa

Na obrázku (Obrázek 4.19) jsou vyobrazena již zpracovaná data technologie LoRa.

| Id | IdRaw | Ts | DevEUI | Appld | OsaX | OsaY | OsaZ | uhelOsaX | uhelOsaY | Teplota | Napeti | Dobijec | Rssi | Status |
|-----|-------|---------------------|--------------------|----------|-----------|------------|----------|----------|----------|---------|--------|---------|------|--------|
| 528 | 288 | 2020-05-14 00:15:58 | XXXXXXXXXXXXXXXXXX | aplikace | 0.0100098 | 0.00512695 | 0.994141 | 0.576878 | 0.295482 | 24.3125 | 3.68 | 3 | -45 | ok |
| 529 | 289 | 2020-05-14 00:17:00 | XXXXXXXXXXXXXXXXXX | aplikace | 1.48462 | 1.36157 | -1.25146 | NULL | NULL | 26.6875 | 4.137 | 3 | -48 | async |

Obrázek 4.19 - Ukázka zpracovaných dat technologie LoRa

Na obrázku (Obrázek 4.20) se nachází tabulka, pro povolení zpracovávání dat daného zařízení. Pro zpracování musí být povolena jak aplikace, tak i „DevEUI“.

| Id | DevEUI | ApplId | povoleni | Poznamka |
|----|------------------|----------|----------|----------|
| 4 | NULL | aplikace | 1 | Aplikace |
| 5 | XXXXXXXXXXXXXXXX | NULL | 1 | node |

Obrázek 4.20 - Povolovací tabulka technologie LoRa

4.5.3 Ukázka dat NB-IoT

Na obrázku (Obrázek 4.21) jsou vyobrazena surová data technologie NB-IoT.

| Id | TsServer | Ts | IMSI | RawData |
|----|---------------------|---------------------|------------------|----------------------------------|
| 13 | 2020-05-14 00:34:57 | 2020-05-14 00:34:57 | XXXXXXXXXXXXXXXX | 44.ff.30.01.38.c0.9e.01.ee.0f.03 |
| 14 | 2020-05-14 00:36:14 | 2020-05-14 00:36:14 | XXXXXXXXXXXXXXXX | a0.ff.ac.04.a8.f3.9c.01.ee.0f.83 |

Obrázek 4.21 - Ukázka surových dat technologie NB-IoT

Na obrázku (Obrázek 4.22) jsou vyobrazena již zpracovaná data technologie NB-IoT.

| Id | IdRaw | Ts | IMSI | OsaX | OsaY | OsaZ | uhelOsaX | uhelOsaY | Teplota | Napeti | Dobijec | Status |
|----|-------|---------------------|------------------|------------|-----------|----------|----------|----------|---------|--------|---------|--------|
| 12 | 13 | 2020-05-14 00:34:57 | XXXXXXXXXXXXXXXX | 0.0114746 | 0.0185547 | 0.996582 | 0.659672 | 1.06663 | 25.875 | 4.078 | 3 | ok |
| 13 | 14 | 2020-05-14 00:36:14 | XXXXXXXXXXXXXXXX | 0.00585938 | 0.072998 | 0.192871 | NULL | NULL | 25.75 | 4.078 | 3 | async |

Obrázek 4.22 - Ukázka zpracovaných dat technologie NB-IoT

Na obrázku (Obrázek 4.23) se nachází tabulka, pro povolení zpracovávání dat daného zařízení.

| Id | IMSI | povoleni | Poznamka |
|----|------------------|----------|----------|
| 1 | XXXXXXXXXXXXXXXX | 1 | node |

Obrázek 4.23 - Povolovací tabulka technologie NB-IoT

4.5.4 Ukázka dat IQRF

Na obrázku (Obrázek 4.24) jsou vyobrazena surová data technologie IQRF.

| Id | TsServer | Ts | gwid | mType | RawData | StatusStr | timeout |
|-----|---------------------|---------------------|--------------|--------|---|-----------|---------|
| 383 | 2020-05-14 00:26:43 | 2020-05-14 00:26:43 | XXXXXXXXXXXX | iqrRaw | 01.00.20.80.5f.05.00.53.74.ff.60.00.38.c0.88.01.14... | ok | 1000 |
| 384 | 2020-05-14 00:27:32 | 2020-05-14 00:27:32 | XXXXXXXXXXXX | iqrRaw | 01.00.20.00.5f.05.00.53.d4.ce.14.b2.48.99.9c.01.fc... | async | 0 |

Obrázek 4.24 - Ukázka surových dat technologie IQRF

Na obrázku (Obrázek 4.25) jsou vyobrazena již zpracovaná data technologie IQRF.

| Id | IdRaw | Ts | gwid | HWPID | NADR | OsaX | OsaY | OsaZ | uhelOsaX | uhelOsaY | Teplota | Napeti | Dobijec | Rssi | Status |
|-----|-------|---------------------|--------------|-------|------|------------|------------|----------|----------|----------|---------|--------|---------|------|--------|
| 383 | 383 | 2020-05-14 00:26:43 | XXXXXXXXXXXX | 055f | 0001 | 0.00854492 | 0.00585938 | 0.996582 | 0.491255 | 0.336865 | 24.5 | 3.604 | 3 | -83 | ok |
| 385 | 384 | 2020-05-14 00:27:32 | XXXXXXXXXXXX | 055f | 0001 | 0.768311 | -1.21753 | 1.60498 | NULL | NULL | 25.75 | 4.092 | 3 | -83 | async |

Obrázek 4.25 - Ukázka zpracovaných dat technologie IQRF

Na obrázku (Obrázek 4.26) se nachází tabulka, pro povolení zpracovávání dat daného zařízení.

| Id | gwid | povoleni | Poznamka |
|----|--------------|----------|----------|
| 1 | XXXXXXXXXXXX | 1 | gateway |

Obrázek 4.26 - Povolovací tabulka technologie IQRF

4.6 Vizualizace dat

Vizualizace naměřených a zpracovaných dat je provedena pomocí vizualizačního nástroje „Grafana“. Tento nástroj běží na totožném serveru, jako je MySQL databáze s daty a kde se také data i zpracovávají. Vizualizace jednotlivých IoT technologií je rozdělena na samostatné dashboardy.

Hodnoty z databáze jsou vybírány k vizualizaci podle času v kolonce „Ts“, který odpovídá času, kdy byla data přijata. Čas kdy byla data zpracována a uložena, se pro vizualizaci nevyužívá. Veškeré grafy jsou nastaveny obdobným způsobem. Odlišují se pouze nastavenou barvou, stylem vykreslení, rozsahem a odkazem na hodnoty k vizualizaci. Vizualizace pro ostatní IoT technologie je nastavena stejně. Liší se jen v případě IoT technologie NB-IoT, která v datech neobsahuje informaci o síle signálu. Graf síly signálu u této technologie byl odstraněn.

Na obrázku (Obrázek 4.27) se nachází ukázka vizualizovaných dat z ilustračního měření technologie LoRA, kde byl upravený interval měření na jednu minutu. Na obrázku jsou vyobrazeny pouze data náklonu a tíhového zrychlení ve dvou grafech. Po zapnutí se zařízení nejprve nacházelo na rovné podložce. Zařízení naměřilo náklon v ose X přibližně jeden stupeň a v ose Y absolutní rovinu, tedy nula stupňů. O půl hodiny později, bylo zařízení nakloněno v ose X přibližně o patnáct stupňů. Za další půlhodinu bylo zařízení pootočeno o devadesát stupňů, aby se zaměřil náklon os. Poté na ukázkou bylo pootočeno zařízení tak, aby bylo nakloněno v obou osách současně. Na závěr bylo zařízení vráceno na rovinu.



Obrázek 4.27 - Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Náklon, Tíhové zrychlení)

Na obrázku (Obrázek 4.28) je vyobrazena teplota a napětí baterie, při ilustračním měření. V závěru ilustračního měření, byl k zařízení umístěn tepelný zdroj, který sloužil k otestování senzoru teploty. Proto se teplota zvýšila z původních 25 °C na hodnotu 29 °C.



Obrázek 4.28- Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Teplota, Napětí baterie)

Na obrázku (Obrázek 4.29) je zachycen stav dobíječe a síla signálu. Při ilustračním měření nebyl připojen solární panel. Z tohoto důvodu měnič baterii nedobíjel a zároveň hlásil chybu termistoru, i když termistor byl v pořádku. Tato chyba je dána typem dobíječe, který ke své správné činnosti vyžaduje připojený solární panel. Síla signálu je velmi kolísavá, což je zapříčiněno umístěním zařízení přímo vedle LoRa brány, která má ve své blízkosti velmi nestabilní sílu signálu. Kdyby se zařízení umístilo například dva metry od brány, signál by již byl stabilní s hodnotou síly signálu okolo -49 dB.



Obrázek 4.29 - Ukázka naměřených dat technologie LoRa, (Stav dobíječe, Síla signálu)

5 Analýza energetické náročnosti

Tato kapitola se zabývá měřením a analýzou spotřeby jednotlivých IoT zařízení. Naměřené výsledné spotřeby jsou uvedeny v grafech a srovnány v tabulce.

5.1 Měření spotřeby elektrické energie

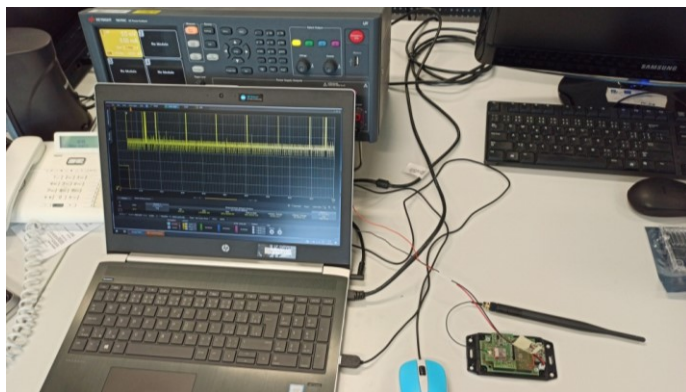
Měření spotřeby probíhalo s odpojeným solárním panelem, aby se vyloučilo dobíjení během měření. Dobíječ ale zůstal k zařízení připojen, aby byla započítána k celkové spotřebě i jeho vlastní spotřeba. Jmenovité napětí baterie je 3,7 V. Při měření bylo zařízení napájeno přes bateriový konektor totožným napětím 3,7 V. Veškeré součástky jsou napájeny stabilizovaným napětím 3,3 V, které stabilizuje stabilizátor již v zařízení. Měřená spotřeba je tedy celková, včetně započítaných veškerých možných ztrát v zařízení. Po celou dobu bylo nastaveno konstantní napětí, proto při měření byly ukládány jen hodnoty proudu.

Měření spotřeby bylo měřeno analyzátozem výkonu N6705C, od firmy KEYSIGHT. Analyzátor umožňuje velmi přesně změřit odběr zařízení při zvoleném napětí. Vzorkovací perioda T byla nastavena na interval 102,4 μ s, což odpovídá podle vzorce (5.1) frekvenci měření 9 765,625 Hz, tedy 9 765,625 vzorků za sekundu. Jeho rozlišení při měření je 8 nA. Na obrázku (Obrázek 5.1) můžeme vidět probíhající měření.

Pro každou technologii bylo prováděno měření samostatně. Programy zařízení byly pro měření spotřeby modifikovány. Změněn byl pouze interval měření z patnácti minut, na jednu minutu, aby mohlo probíhat měření rychleji. Pro každou technologii probíhalo měření 10 minut, během kterých došlo k vykonání deseti cyklů zařízení. Za jeden cyklus je považováno získání dat ze senzorů, jejich zpracování a následné odeslání pomocí IoT technologie. V přílohách jsou přiloženy grafy spotřeby s pěti vyznačenými, po sobě následujícími, cykly. Jednotlivé cykly jsou označeny červenými svislými značkami a celý analyzovaný úsek, zelenými svislými značkami. Těchto pět cyklů bylo vybráno tak, aby bylo zanedbáno první spuštění se zvýšenou spotřebou způsobenou inicializací. Vyznačení jednotlivých cyklů bylo provedeno graficky. Odběr při prvním spuštění pro analýzu spotřeby není důležitý, protože jeho zvýšená spotřeba, bude vždy jen jednou po zapnutí zařízení. Z tohoto důvodu byla data prvních cyklů nezahrnuta do analýzy. Pro lepší vizuální srovnání proudových odběrů jednotlivých IoT technologií, bylo měřítka y-ové osy nastaveno stejně pro všechny technologie. Jiná měřítka jsou pouze v grafech zobrazující podrobněji pouze jeden výsek zařízení v činnosti.

$$f_{\text{vzorkování}} = \frac{1}{T} \quad (5.1)$$

Kde T je perioda vzorkování.



Obrázek 5.1 - Měření spotřeby na měřicím pracovišti

5.2 Analýza naměřených dat energetické náročnosti

Analýza dat probíhala pouze z pěti vybraných po sobě jdoucích cyklů. $I_{avg_činnost}$ odpovídá průměrnému proudu mezi cykly, kdy zařízení je uspáno a v činnosti jsou pouze senzory. Výpočet probíhal pomocí softwaru „Matlab Ra2018“. Průměr byl vypočten pomocí funkce „mean“ ze všech naměřených vzorků, kdy právě probíhala činnost. $I_{avg_spánek}$ byl vypočten obdobným způsobem, ze všech naměřených hodnot, kdy bylo zařízení v režimu spánku. Dále byl vypočten průměrný odebíraný výkon $P_{avg_činnost}$, při činnosti podle vzorce (5.2) a $P_{avg_spánek}$, při režimu spánku podle vzorce (5.3).

$$P_{avg_činnost} = U \cdot I_{avg_činnost} \quad (5.2)$$

Kde U je konstantní nastavení napětí 3,7V a $I_{avg_činnost}$ průměrně odebíraný proud při činnosti.

$$P_{avg_spánek} = U \cdot I_{avg_spánek} \quad (5.3)$$

Kde U je konstantní nastavení napětí 3,7V a $I_{avg_spánek}$ průměrně odebíraný proud při režimu spánku.

Z vyznačených cyklů byl zjištěn průměrný čas jednoho cyklu pro každou technologii. Protože při měření, jak již bylo dříve zmíněno, byl interval měření pozměněn na jednu minutu, výpočet času $t_{spánek}$, kdy je zařízení v režimu spánku, probíhal podle vzorce (5.4).

$$t_{spánek} = t_{měření} - t_{činnost} \quad (5.4)$$

Kde $t_{měření}$ je interval měření a $t_{činnost}$ je čas zařízení v činnosti.

Dále ze získaných výpočtů byly dopočteny energie. $E_{činnost}$ podle vzorce (5.5), odpovídající spotřebované energii při jednom cyklu, kdy je zařízení v činnosti. $E_{činnost_spánek}$ podle vzorce (5.6), odpovídající spotřebované energii za čas jednoho cyklu, kdy je zařízení v režimu spánku. Také byla vypočtena energie $E_{spánek}$ podle vzorce (5.7). Tato energie představuje spotřebovanou energii zařízení mezi jednotlivými cykly zařízení v činnosti. Pro lepší přehlednost byla i vypočtena energie $E_{vysílání}$, která odpovídá potřebné energii, kterou navíc zařízení v činnosti spotřebuje oproti energii, kterou by spotřebovalo v režimu spánku. Výpočet byl vypočten podle vzorce (5.8). Jako poslední vypočtená energie, byla $E_{celková}$, podle vzorce (5.9). Ta odpovídá celkové spotřebované energii během jednoho intervalu měření patnácti minut, kdy je jednou zařízení v činnosti a po zbytek času je uspáno.

$$E_{činnost} = P_{avg_činnost} \cdot t_{činnost} \quad (5.5)$$

$$E_{činnost_spánek} = P_{avg_spánek} \cdot t_{činnost} \quad (5.6)$$

$$E_{spánek} = P_{avg_spánek} \cdot t_{spánek} \quad (5.7)$$

$$E_{vysílání} = E_{činnost} - E_{cyklus_spánek} \quad (5.8)$$

$$E_{celková} = E_{činnost} + E_{spánek} \quad (5.9)$$

Kde $P_{avg_činnost}$ je průměrný odebíraný výkon při činnosti, $t_{činnost}$ je průměrný čas jednoho cyklu, $P_{avg_spánek}$ je průměrný odebíraný výkon při režimu spánku, $t_{spánek}$ je čas, kde je zařízení v režimu spánku.

V tabulce (Tabulka 5.1) jsou uvedeny veškeré naměřené nebo vypočtené údaje, týkající se energetické spotřeby zařízení s jednotlivými IoT technologiemi.

Tabulka 5.1 - Tabulka s údaji energetické analýzy

| | | Sigfox | LoRa | NB-IoT | IQRF |
|--|------|-----------|------------------|-----------|-----------------|
| $t_{\text{činnost}}$ | s | 8,9704 | 2,3142 | 23,2623 | 0,85928 |
| $t_{\text{spánek}}$ | s | 891,0296 | 897,6858 | 876,7377 | 899,1407 |
| $I_{\text{avg činnost}}$ | mA | 35,8965 | 4,5712 | 37,4501 | 6,1086 |
| $I_{\text{avg spánek}}$ | mA | 0,57069 | 0,48286 | 0,50759 | 0,69465 |
| $P_{\text{avg činnost}}$ | mW | 132,8169 | 16,9133 | 138,5652 | 22,6017 |
| $P_{\text{avg spánek}}$ | mW | 2,1115 | 1,7866 | 1,8781 | 2,5702 |
| $E_{\text{činnost}}$ | mW·s | 1191,4268 | 39,1401 | 3223,3468 | 19,4212 |
| $E_{\text{spánek}}$ | mW·s | 1881,451 | 1603,79 | 1646,5849 | 2310,9646 |
| $E_{\text{vysílání}}$ | mW·s | 1172,4853 | 35,0057 | 3179,6583 | 17,2127 |
| $E_{\text{celková}}$ | mW·s | 3072,8778 | 1642,9301 | 4869,9317 | 2330,3858 |
| $T_{\text{měření}} = 15\text{m} = 900\text{s}$, $U = 3,7\text{V}$, $f_{\text{vzorkování}} = 9\,765,625\text{Hz}$ | | | | | |

Pro lepší přehlednost srovnání elektrické spotřeby jednotlivých IoT technologií, jsou tučně zvýrazněny nejlepší hodnoty pro nejnižší energetickou náročnost. Nejrychlejší ze čtyř srovnávaných IoT technologií je technologie IQRF. Celkový čas pro vyčtení veškerých dat, jak ze senzorů, tak i z dobíječe, je přibližně 0,86 sekund. Druhá nejrychlejší technologie je LoRa, následuje Sigfox s časem okolo devíti sekund a nejpomaleji data odesílá technologie NB-IoT.

Při činnosti nejméně průměrného proudu a tedy i nejnižší průměrný výkon, odebírá technologie LoRa. Avšak odesílání trvá déle než u technologie IQRF, které má tyto průměrné hodnoty vyšší. Po výpočtu energie pro odeslání dat, spotřebovává LoRa přibližně dvakrát více energie než IQRF. Energie při činnosti je tedy rozhodujícím faktorem pro určení nejnižší energetické náročnosti dané technologie.

V čase, kdy zařízení je uspáno a nedochází k měření, ani k odesílání dat, nejméně energie odebírá technologie LoRa. Nejvíce energie odebírá technologie IQRF. Obdobná spotřeba jako u technologie LoRa je i u technologie NB-IoT. S mírně zvýšenou spotřebou je další v pořadí technologie Sigfox.

Činnost zařízení je stanovena na interval patnácti minut. V tomto intervalu dojde vždy právě k jednomu vyčtení dat a jejich odeslání. Při takto nastaveném intervalu měření byly provedeny výpočty celkově spotřebované energie jednoho cyklu. Energeticky nejúspornější technologií se jeví LoRa, která při jednom cyklu spotřebuje přibližně 1,64 W.s. Nejméně úspornou technologií se jeví NB-IoT, která spotřebuje při jednom cyklu 4,87 W.s. Technologie Sigfox spotřebuje přibližně dvojnásobek energie oproti technologii Lora, tedy 3,07 W.s. IQRF technologie spotřebuje přibližně o třetinu více energie než LoRa.

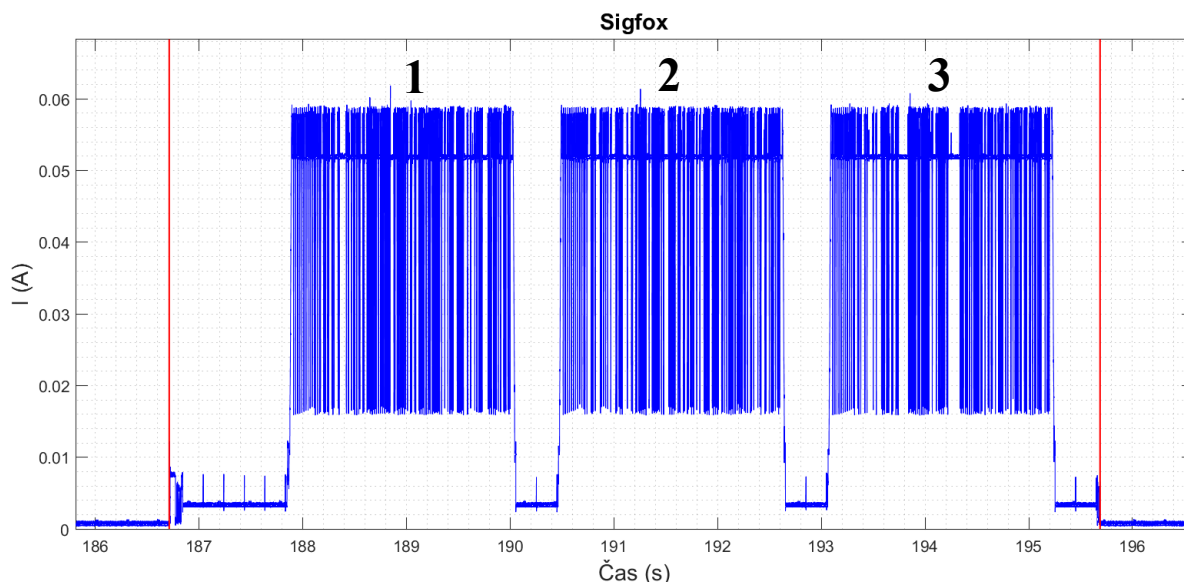
Každá technologie funguje na jiném principu a udávaný maximální dosah se velmi liší. Také každá technologie pracuje v jiném režimu. Například Sigfox, LoRa a NB-IoT, data odesílají a naslouchají jen v určitých krátkých časech, před nebo po vysílání. Technologie IQRF pracuje v zcela jiném režimu, kdy modul stále naslouchá v určitém krátkém intervalu a je tedy schopen data přijímat téměř kdykoli. Z tohoto důvodu jsou naměřené hodnoty a vypočtené energie sice srovnány, ale zcela je porovnávat nelze. Kdyby technologie IQRF nenaslouchala po celou dobu spánku, její spotřeby by se výrazně snížila a zcela by zvítězila v energetické náročnosti. Taktéž ostatní technologie, jako je například LoRa, kdyby pracovala v režimu C, kdy stále naslouchá, její spotřeby by se výrazně zvýšila v době spánku a zvítězila by opět technologie IQRF.

5.3 Průběhy proudových odběrů

Tato podkapitola se zabývá grafickým zobrazením a vysvětlením proudových odběrů jednotlivých IoT technologií.

5.3.1 Sigfox

Na obrázku (Obrázek 5.2), můžeme vidět graf spotřeby zařízení při činnosti, s IoT modulem Sigfox.



Obrázek 5.2- graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií Sigfox

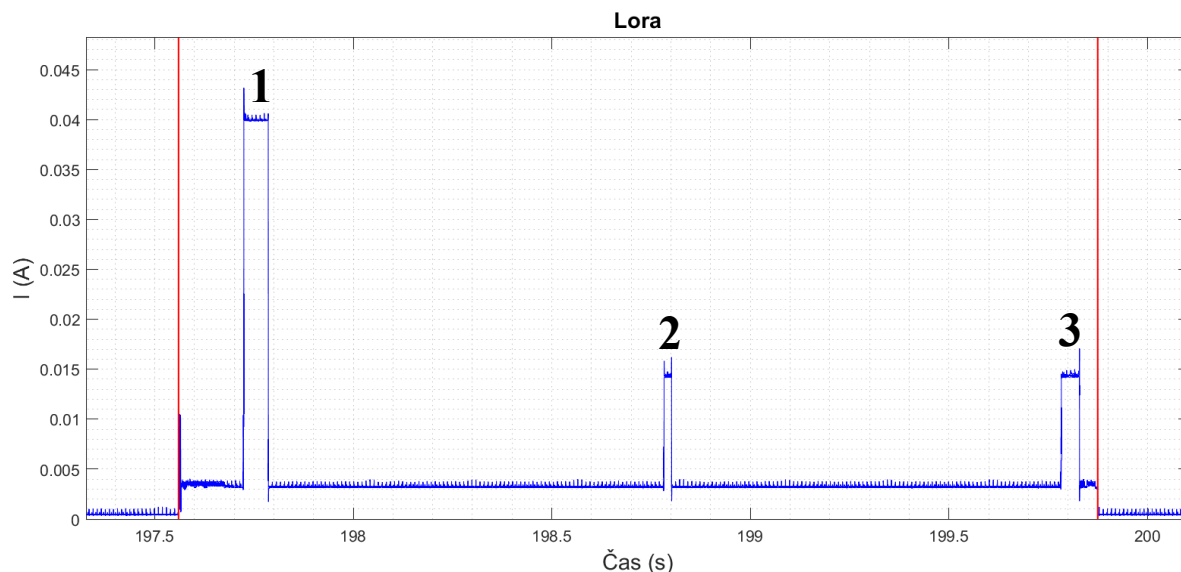
Na začátku cyklu, vyznačeném červenou svislou značkou, můžeme vidět zvýšený proudový odběr. Toto zvýšení odběru znamená probuzení mikrokontroléru a následného komunikování se senzory při vyčítání naměřených hodnot. Dále dojde k probuzení Sigfox čipu pomocí hardwarového pinu a rychlý test čipu, pomocí vyslání AT příkazu, zdali je již probuzen a připraven k další činnosti. Následuje odeslání dat přes rozhraní UART. V grafu můžeme vidět přibližně konstantní lehce zvýšený odběr, kdy čip zpracovává data a připravuje se k jejich odeslání. Přibližně každých 200 ms, dochází k proudovým špičkám, které nejspíše způsobuje spouštění vnitřního časovače Sigfox čipu. Data jsou čipem duplicitně odesílána třikrát opakovaně za sebou, pro zvýšení úspěšnosti příjmu dat Sigfox bránou. Každé odeslání dat trvá přibližně dvě sekundy. Jednotlivé úseky odesílání jsou na obrázku (Obrázek 5.2) označeny číslicemi jedna až tři. Celkový čas odeslání duplicitních dat, třikrát po sobě, včetně malých prodlev mezi jednotlivým odesláním, se pohybuje okolo sedmi sekund. Po dokončení odeslání dat je modul uspán společně s mikrokontrolérem a cyklus je tedy ukončen. Ukončení je na obrázku (Obrázek 5.2) vyznačeno opět červenou svislou značkou.

Vysílací výkon je možné regulovat v rozsahu 0 až 14. Rozsah přímo odpovídá vysílacímu výkonu v dBm. Maximální vysílací výkon je 14 dBm. Spotřeba elektrické energie byla měřena právě při nastaveném maximálním vysílacím výkonu 14 dBm.

Spotřebu Sigfox technologie by bylo možné snížit, například pomocí změny počtu opakování odesílání dat z typických tří, například na jednu. Tato změna se ale nedoporučuje provádět, protože by došlo ke snížení spolehlivosti odeslání dat. K bezpečným snížením spotřeby elektrické energie, může sloužit změna vysílacího výkonu, pokud je pokrytí oblastí, ve které se zařízení nachází, dostatečné, i pro nižší vysílací výkon.

5.3.2 Lora

Na obrázku (Obrázek 5.3), můžeme vidět graf spotřeby zařízení při činnosti, s IoT modulem LoRa.



Obrázek 5.3 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií LoRa

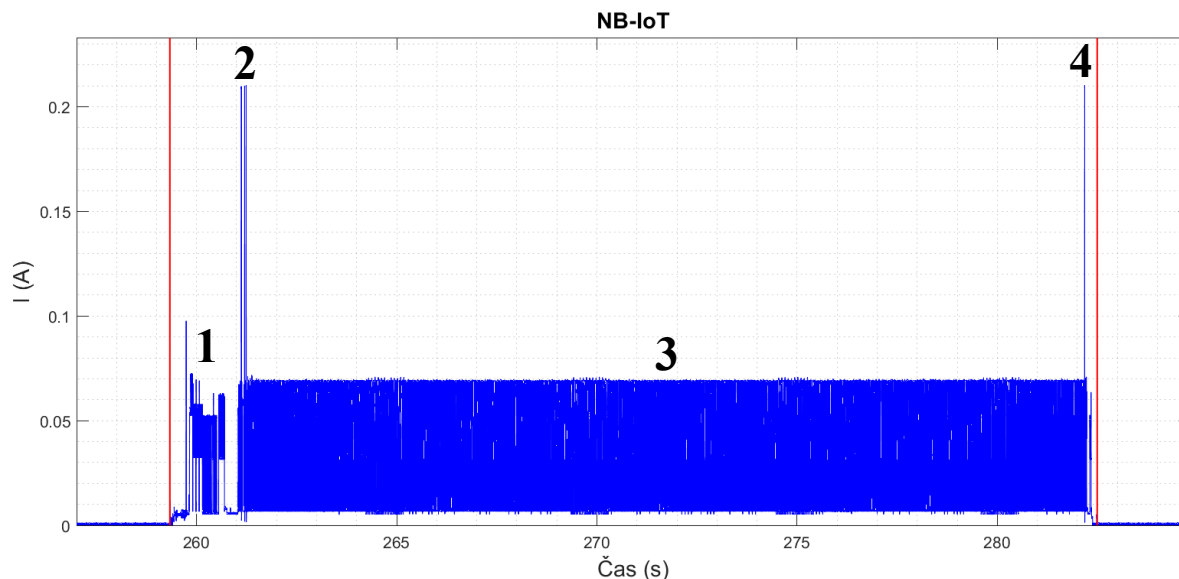
První proudová špička, téměř splývající s první vyznačující červenou značkou na obrázku (Obrázek 5.3), znamená probuzení mikrokontroléru z režimu spánku. Následuje komunikace se senzory, při které se vyčítají měřené veličiny a probuzení LoRa modulu. Nejvýraznější proudový odběr, označen jedničkou představuje bezdrátové odeslání dat. Protože zařízení pracuje ve třídě A, po odeslání dat jsou otevřeny vždy dva naslouchací okna, určené pro příjem dat. První časový interval, pro otevření prvního naslouchacího okna, je nastaven na hodnotu 1000 ms. Přibližně po tomto čase dojde k otevření prvního naslouchacího okna, příslušícího dalšímu proudovému odběr, označeného číslem dva. Poslední proudový odběr, označen číslem tři, představuje spuštění druhého naslouchacího okna, po uplynutí 2000 ms, od odeslání zprávy. Čas spuštění prvního naslouchacího okna je možné změnit, v rozsahu od 0 ms až 65 535 ms, s rozlišením 1 ms. Čas spuštění druhého naslouchacího okna není možné změnit. Je vždy nastaven na hodnotu prvního naslouchacího okna plus 1000 ms. V případě překročení hodnoty 65 535 ms, druhého naslouchacího okna, dojde k přetečení a nastavení druhého naslouchacího okna na hodnotu menší, než čas prvního naslouchacího okna. V tomto případě přetečení, po vykonání prvního naslouchacího okna, nebude možné data dále odesílat, protože modul zůstane zaneprázdněn. Tato skutečnost byla zjištěna při experimentálních pokusech s nastavením Lora čipu při měření jeho spotřeby.

Vysílací výkon je možné regulovat v rozsahu -3 až 15, maximální vysílací výkon je 14dBm. Rozsah však umožňuje nastavení až hodnoty 15, kdy se počítá s úbytkem v konektorech a na anténním vedení. Měření spotřeby proběhlo při maximálním vysílacím výkonu 14 dBm, kdy nejsou ztráty na anténním vedení kompenzovány zvýšením výkonu o 1 dBm.

Spotřebu při využití LoRa technologie by bylo možné snížit, například zkrácením času, kdy má dojít k otevření prvního naslouchacího okna, z 1000 ms na nulu. Takto by bylo možné výrazně zkrátit čas, kdy je LoRa modul v činnosti a odebírá vyšší proud než v režimu spánku. Taktéž je možné spotřebu snížit nastavením nižšího vysílacího výkonu. Výrazným snížením však může dojít až ke ztrátě spojení, mezi modulem a LoRa bránou, zejména v oblastech se slabším signálovým pokrytím LoRa.

5.3.3 NB-IoT

Na obrázku (Obrázek 5.4), můžeme vidět graf spotřeby zařízení při činnosti, s IoT modulem NB-IoT.



Obrázek 5.4 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií NB-IoT

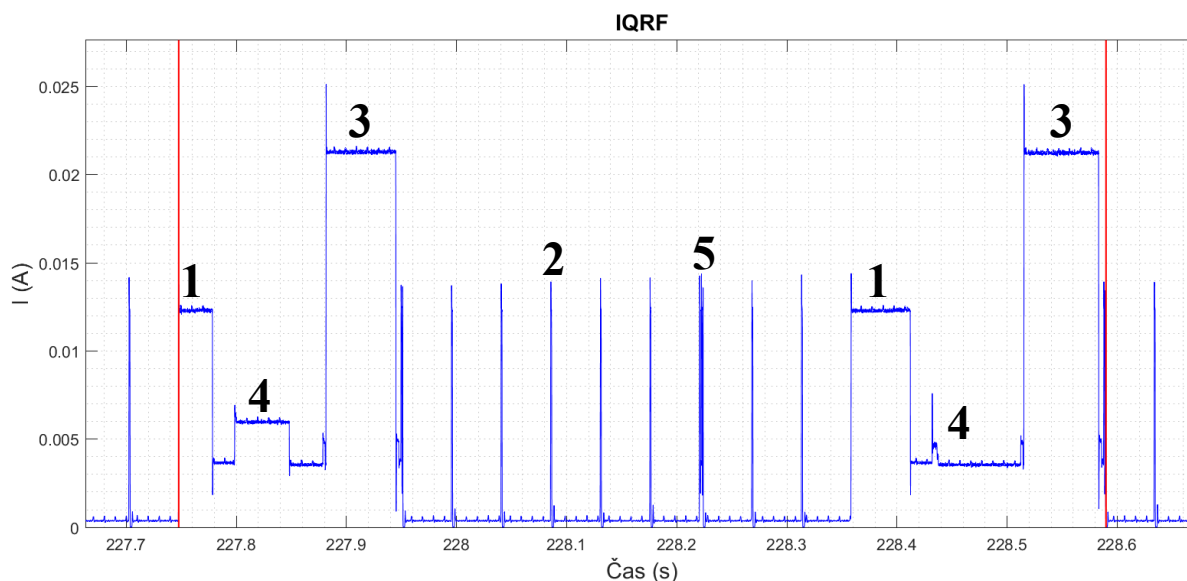
První svislá červená značka vyznačuje začátek činnosti zařízení. V tuto chvíli dochází k probuzení mikrokontroléru a vyčítání dat ze senzorů, včetně změření stavu baterie, zjištění stavu dobíječe, přípravě dat pro odeslání zprávy a poté jejich odeslání.

Před samotným odesláním dat je nejprve otevřeno přijímací okno, po které následuje vysílání zprávy. Opět se otevře přijímací okno následované vysílacím oknem. Na obrázku (Obrázek 5.4) je tato část vyznačena číslem jedna. Po vykonání počátečního úseku komunikace přechází modul do režimu šetřícího elektrickou energii nazývaného PSM, ve kterém setrvává přibližně dvacet sekund. Na obrázku (Obrázek 5.4) vyznačení číslem dvě. Průměrná spotřeba proudu v této oblasti je přibližně 40 mA. Poté se spustí poslední vysílací okno a přenos dat je ukončen, označeno číslem tři. Ihned po ukončení vysílání je mikrokontrolér opět uspán a celá činnost zařízení je ukončena. Na obrázku je opět konec činnosti vyznačen červenou svislou značkou. IoT modul v případě NB-IoT není nutné uspávat, protože čip Quectel BC68 je nastaven na režim šetrného odběru elektrické energie a uspává se tedy sám.

Maximální vysílací výkon čipu je udávám $23 \text{ dBm} \pm 2 \text{ dBm}$. Měření probíhalo právě při tomto maximálním vysílacím výkonu.

5.3.4 IQRF

Na obrázku (Obrázek 5.5), můžeme vidět graf naměřené spotřeby zařízení při činnosti, s IoT modulem IQRF a základní deskou s neosazeným mikrokontrolérem.



Obrázek 5.5 - graf spotřeby jednoho cyklu s IoT technologií IQRF

Začátek činnosti je označen červenou svislou značkou. Koordinátor sítě vyslal požadavek pro spuštění cyklu, aby zařízení odeslalo data zpětně koordinátorovi. Příjem požadavku koordinátora je vyznačen číslem jedna. Číslem tři je označeno odesílání dat, jedná se o části s největší spotřebou elektrické energie. V pravidelných intervalech se vždy zapíná rádiová část IQRF čipu pro příjem data. Jeden z nich můžeme vidět na obrázku (Obrázek 5.5) vyznačen číslem dvě. Číslem čtyři jsou označeny části, kde dochází ke spuštění periferie, například komunikace se senzory. Konec činnosti je vyznačen červenou svislou značkou.

Čip po ukončení činnosti není nutné uspávat, protože se sám stará o nízkou spotřebu. Činnost je řízena koordinátorem, proto v čipu není ani nastaven časovač pro spuštění, ale co určitý interval se testuje, jestli nepřišla zpráva od koordinátora. Na obrázku (Obrázek 5.5) vyznačeno číslem 5, můžeme vidět nejspíše začátek příjmu zprávy od koordinátora, která ale není určena pro tento modul. Proto je její příjem ihned ukončen, aby se opět snížila spotřeba.

Měření spotřeby probíhalo při nastaveném maximálním výkonu vysílání. IQRF brána se nacházela přibližně dva metry od měřeného čipu, bez překážek.

5.4 LoRa brána a IQRF brána

Měření energetické náročnosti na bránách LoRa a IQRF nebylo provedeno. Energetická spotřeba těchto brán, je velmi proměnlivá v závislosti na počtu komunikujících zařízení s nimi. Ve většině případů nebývá kladen důraz na nízkou spotřebu brány, protože se brány umísťují poblíž elektrické energie a jsou tedy napájeny například ze síťového adaptéru. Brány ke své činnosti, aby mohly data přeposílat dále do internetu, vyžadují připojení do internetové sítě. V případě využití raspberry Pi, verze bez bezdrátového připojení, není jiná možnost než využití ethernetového kabelu. Minipočítač raspberry, s přidáním rozšiřujícího modulu, je možné napájet právě pomocí ethernetového kabelu. Tímto způsobem se vyloučí nutnost bateriového provozu. Při výpadku napájení po ethernetovém kabelu, je většinou vyřazen i přístup k internetu a v tuto chvíli je provoz brán nepotřebný, protože přijatá data se zahodí a dále neodešlou do internetové sítě.

5.5 Výpočet výdrže baterie

Pro napájení zařízení byla použita Li-Pol baterie s kapacitou 7,4 Wh, což odpovídá hodnotě 26 640 000 mWs. Podle vzorce (5.10) byl vypočten teoretický maximální počet cyklů, na jedno nabití baterie bez jejího dobíjení. Dále podle vzorce (5.11) maximální čas t_{MAX} provozu.

$$cykly_{MAX} = \frac{E_{baterie}}{E_{celková}} \quad (5.10)$$

$$t_{MAX} = cykly_{MAX} \cdot interval \quad (5.11)$$

Kde $cykly_{MAX}$ značí maximální počet vykonaných cyklů na jedno nabití baterie, $E_{baterie}$ je celková energie baterie, $E_{celková}$ je potřebná energie pro vykonání jednoho cyklu, t_{MAX} je maximální čas provozu na jedno nabití baterie a interval je čas jednoho cyklu.

V tabulce (Tabulka 5.2) jsou uvedeny výsledné maximální počty vykonaných cyklů a maximální doby provozu všech IoT technologií. Doby pro lepší orientaci jsou vždy uvedeny v hodinách, dnech nebo měsících.

Tabulka 5.2 - Maximální teoretická výdrž zařízení na jedno nabití baterie

| | | Sigfox | LoRa | NB-IoT | IQRF |
|---------------|--------|---------|----------|---------|----------|
| $cykly_{MAX}$ | | 8669,4 | 16216,93 | 5470,30 | 11431,58 |
| t_{MAX} | hodiny | 3467,76 | 6489,77 | 2188,12 | 4572,63 |
| | dny | 144,49 | 270,287 | 91,17 | 190,53 |
| | měsíce | 4,74 | 8,86 | 2,99 | 6,25 |

V reálných podmínkách bude baterie dobíjena solárním panelem. Výpočet tedy slouží pouze jako orientační přehled výdrže na baterii.

6 Vize do budoucna

V průběhu práce jsem se snažil získat nadhled nad těmito technologiemi. Z tohoto důvodu jsem se zúčastnil odborného semináře na téma „Neinvazivní IoT projekty do průmyslu i domácností prakticky“, pořádaného společností HARDWARIO s.r.o., kde jsem získal certifikát opravňující mě implementovat produkty a technologie společnosti HARDWARIO.

V oblasti vývoje bezdrátových měřicích systémů s použitím IoT technologií, bych chtěl dále pokračovat na doktorském studiu. Již při tvorbě této práce jsem se podílel na projektech zaměřených právě na měřicí systémy využívající IoT technologie, ve kterých se spolupracuje s významnými geotechnickými firmami. Dnes stále více firem poptává měřicí systémy, pro měření různých veličin, pomocí IoT technologií. Celkově tyto technologie mají určitě obrovský potenciál do budoucna. Využití IoT technologií totiž roste exponenciálně.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat monitorovací systém, pro měření stability stavebních konstrukcí, založeném na platformě IoT technologií. Návrh vyžadoval výběr IoT technologií a veškerých potřebných komponent pro realizaci měřicího systému.

Pro měřicí systém byly vybrány čtyři IoT technologie, Sigfox, LoRa, NB-IoT a IQRF. Tyto technologie byly nejprve teoreticky popsány. Popisovány byly zejména architektury sítí, rádiový přenos a také pokrytí České republiky signálem pro danou technologii.

Hardware měřicího systému je založen na využití základní desky, která obsahuje veškeré potřebné komponenty. Na základní desku byly umístěny dva senzory. Prvním senzorem byl akcelerometr, určený pro měření tíhového zrychlení a následným přepočtem k měření náklonu stavební konstrukce. Druhým senzorem byl teploměr, který měří teplotu uvnitř zařízení. Základní deska také obsahuje dobíječ, který dobíjí baterii ze solárního panelu. K základní desce se pomocí konektoru připojuje IoT komunikační modul. Základem celého zařízení, v případě IoT technologií Sigfox, LoRa, NB-IoT je mikrokontrolér. V případě IQRF modulu na základní desce není mikrokontrolér osazen, protože není využíván. Mikrokontrolér komunikuje s IoT modulem pomocí UART komunikační linky. Celé zařízení bylo navrženo univerzálně tak, aby umožňovalo výměnu IoT modulu bez jakékoli další změny. Software byl navržen, aby sám rozpoznal typ IoT modulu a patřičně s ním komunikoval. Konstrukčně je zařízení zrealizováno v jediné krabici, na kterou byl přilepen solární panel pro dobíjení baterie. Aby bylo k zařízení možné připojit externí anténu, byl z boku krabice vyveden konektor pro externí anténu. Pro příjem dat, po vlastní vybudované síti, byla postavena LoRa a IQRF brána. Obě brány jsou zrealizovány pomocí mikropočítače Raspberry PI.

Software byl navržen pro co nejnížší spotřebu elektrické energie. Veškerý chod programu byl zrealizován pomocí časovačů a přerušení tak, aby mikrokontrolér co nejdéle byl udržován v režimu spánku. V případě IQRF čipu byl program vytvořen co nejkratší, aby se provedl co nejdříve a čip mohl opět přejít do režimu spánku.

Komunikace IoT technologií Sigfox, byla vyzkoušena s více Sigfox moduly. Při jejich registraci modulu došlo k několika problémům, kdy se jednalo o chybu na stránkách Sigfoxu, která byla řešena několikrát s podporou. Chyby byly vždy předány Sigfox správcům serveru, kteří by se měli je pokusit opravit. Registraci Sigfox modulu, tak mnohdy musela vyřešit Sigfox podpora, která daný modul přidávala jiným způsobem. I když registrace modulu byla obtížná, přeposílání dat na školní server proběhlo vždy úspěšně bez problémů.

IoT komunikačních modulů typu LoRa bylo také vyzkoušeno více druhů. Nejprve byly moduly registrovány na server TTN, kde se vždy modul podařilo úspěšně přidat. Ovšem někdy při registraci byl modul úspěšně přidán, ale data z modulu nepřicházela. K odstranění tohoto problému pomohlo modul odregistrovat a zaregistrovat jej stejným způsobem. V případě registrace modulu na server ČRA nebylo možné některé typy LoRa modulů zaregistrovat. Ani při kontaktování ČRA podpory, nebyl tento problém vyřešen. Údajně měla být chyba na straně výrobce LoRa modulu. Opět bylo řešeno s výrobcem modulů, který tvrdil, že je chyba na straně ČRA. Tento se spor trval přibližně půl roku. Ani po vydatné komunikaci s oběma stranami problém nebyl vyřešen. Zaregistrovat na ČRA se zdařilo pouze modul RN2483, využívaný v této práci.

Také u technologie NB-IoT se vyskytlo několik problémů. Prvním problémem byla prošlá licence u SIM karty Vodafone, která měla být aktivní. Dalším problémem byl zakázaný UDP port na školním serveru, díky čemuž nebylo možné data přijímat. U operátora T-mobile je vše připraveno, stačí jen povolit daný port.

Příjem dat pomocí operátora Vodafone byl, vyřešen zapůjčením funkční SIM karty od společnost HARDWARIO, která SIM kartu ochotně zapůjčila a umožnila využívání jejich serveru, kam se odesílají. Přeposílání dat na školní server bylo zrealizováno http metodou POST.

S technologií IQRF nebyly žádné velké problémy. Tuto technologii jsem využíval již na školních projektech, kde jsem byl s jejím využíváním proškolen. Snad jediným problémem vznikl při instalaci IQRF brány, který byl způsoben špatnou čtečkou mikro SD karet, v počítači. Vypálení obrazu vždy dopadlo úspěšně, spuštění Raspbery PI také, ale některé části systému byly poškozeny a brána tak plně nefungovala. Problém byl odstraněn využitím externí čtečky. Totožný problém nastal i u LoRa brány.

Po provedení energetické analýzy byl zjištěn fakt, že nejúspornější technologií je LoRa. Ovšem tento fakt platí jen při daném nastavení. Při jiném nastavení by pravděpodobně nejméně elektrické energie spotřebovávala technologie IQRF.

Použitá literatura

- [1] ZOOCO: Žijte chytré [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.zooco.io/blog/jak-se-vyznat-v-zaplave-siti-pro-internet-veci/>
- [2] Sigfox [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>
- [3] IoT PORTÁL: BRÁNA DO SVĚTA INTERNETU VĚCÍ [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2017/05/29/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti/>
- [4] IoT PORTÁL: BRÁNA DO SVĚTA INTERNETU VĚCÍ [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2019/09/16/sit-sigfox-je-v-cesku-dostavena/>
- [5] Sigfox [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [6] Tzbinfo [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>
- [7] IoT PORTÁL [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2016/02/29/lorawan/>
- [8] Vývoj.hw.com: Profesionální elektronika [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/rychla-implementace-technologie-lorawan.html>
- [9] NEWIE VENTURES [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.newieventures.com.au/blogtext/2018/2/26/lorawan-otaa-or-abp>
- [10] CRA [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>
- [11] EMAN [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/>
- [12] OSEL: Objective source E-learning [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: https://www.osel.cz/8732-lora-technology.html?typ=odpoved&id_prispevku=142574
- [13] IoT PORTÁL: BRÁNA DO SVĚTA INTERNETU VĚCÍ [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2016/04/30/narrowband-iot/>
- [14] Ericsson [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>
- [15] IoT PORTÁL: BRÁNA DO SVĚTA INTERNETU VĚCÍ [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2017/11/27/iqrf/>
- [16] IQRF [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/technology>
- [17] ROOT.CZ [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/bezdratova-inovace-pro-mala-data-jmenem-iqrf/>
- [18] DATASHEET WISOL. [online]. [cit. 2020-1-2]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/890/wisol_wssfm10r1at.pdf
- [19] DATASHEET RN2483. [online]. [cit. 2020-1-3]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS50002346D.pdf>

- [20] DATASHEET MPC9808. [online]. [cit. 2019-11-8]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25095A.pdf>
- [21] DATASHEET LIS2DW12. [online]. [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2581666.pdf?_ga=2.159672701.1142295564.1589547718-1263424287.1587565972
- [22] *RPishop.cz* [online]. [cit. 2020-2-5]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-2b/170-raspberry-pi-2-1024-mb-ram.html>
- [23] DATASHEET IC880A. [online]. [cit. 2020-2-5]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/productdata/61/a5/9d83830f/ic880a-spi.pdf>
- [24] DATASHEET QUECTEL BC68. [online]. [cit. 2020-2-19]. Dostupné z: <http://micromodern.ir/wp-content/uploads/2018/09/Quectel-BC68-Hardware-Design-datasheet.pdf>
- [25] DATASHEET STM32L083CZT6. [online]. [cit. 2019-10-4]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2309238.pdf?_ga=2.53821672.1142295564.1589547718-1263424287.1587565972
- [26] DATASHEET LT3652EMSE#PBF. [online]. [cit. 2020-3-8]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2006706.pdf?_ga=2.158164474.1142295564.1589547718-1263424287.1587565972
- [27] DATASHEET QUECTEL ATCOMMANDS. [online]. [cit. 2020-3-14]. Dostupné z: https://www.quectel.com/UploadImage/Downlad/Quectel_BC95-G&BC68_AT_Commands_Manual_V1.1.pdf
- [28] DATASHEET RN2483 ATCOMMANDS. [online]. [cit. 2020-3-9]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-LoRa-Technology-Module-Command-Reference-User-Guide-DS40001784G.pdf>

A Seznam příloh

Součástí práce jsou přílohy v elektronické podobě.

- Programy
 - Software_mikrokontroler.rar
 - Software_IQRF_cip.c
- Grafy spotřeby
 - Sigfox_mereni.png
 - Sigfox_cinnost.png
 - LoRa_mereni.png
 - LoRa_cinnost.png
 - NB_IoT_mereni.png
 - NB_IoT_cinnost.png
 - IQRF_mereni.png
 - IQRF_cinnost.png
- Serverové soubory pro přenos dat
 - Sigfox_Post.php
 - LoRa_MQTT.py
 - NB_IoT_post.php
 - IQRF_MQTT.py
- Serverové soubory pro zpracování dat
 - Parser_Sigfox.py
 - Parser_LoRa.py
 - Parser_NB_IoT.py
 - Parser_IQRF.py